



Engenharia Civil UM

desde 1995



Os Editores:

José Barroso de Aguiar

Sandra Cunha

NÚMERO

Especial **67**

2024

e-ISSN 2795-5982
ISSN 0873-1152



Universidade do Minho
Departamento de Engenharia Civil



Editores

José Luís Barroso de Aguiar, Centro de Território, Ambiente e Construção, Universidade do Minho, Portugal

Sandra Cunha, Centro de Território, Ambiente e Construção, Universidade do Minho, Portugal

Conselho Editorial

Aires Camões, Universidade do Minho, Portugal

Álvaro Cunha, Universidade do Porto, Portugal

Anabela Paiva, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Portugal

António Tadeu, Universidade de Coimbra, Portugal

António Correia, Universidade do Minho, Portugal

António Baptista, Oregon Health & Science University, USA

António Pais Antunes, Universidade de Coimbra, Portugal

António Madaleno, Universidade Agostinho Neto, Angola

António Matos, Universidade Eduardo Mondlane, Moçambique

Antônio Silva, Universidade Federal de São Carlos, Brasil

Carlito Junior, Universidade de São Paulo, Brasil

Cristina Alvarez, Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil

Daniel Oliveira, Universidade do Minho, Portugal

Eduardo Julio, Universidade de Lisboa, Portugal

Eliane Viviani, Universidade Federal de São Carlos, Brasil

Enio Figueiredo, Universidade Federal de Goiás, Brasil

Fernando Branco, Universidade de Lisboa, Portugal

Fernando Veloso Gomes, Universidade do Porto, Portugal

Fernando Pacheco Torgal, Universidade do Minho, Portugal

Flávio Silva, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Brasil

Flávio Cunto, Universidade Federal do Ceará, Brasil

Francisco Martins, Universidade do Minho, Portugal

Glicério Trichês, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil

Guilherme Parsekian, Universidade Federal de São Carlos, Brasil

Guillermo Etse, National University of Tucumán, Argentina

Gustavo Ayala, National Autonomous University of México, México

Hélder Sousa, Universidade do Minho, Portugal

Holmer Savastano Jr, Universidade de São Paulo, Brasil

Ignacio Perez, Universidad de La Coruña, Espanha

Jaume Avellaneda, Universitat Politècnica de Catalunya, Espanha

Joan Casas, Universitat Politècnica de Catalunya, Espanha

João Castro Gomes, Universidade da Beira Interior, Portugal

Joaquim Barros, Universidade do Minho, Portugal

Jorge Brito, Universidade de Lisboa, Portugal

Jorge Pais, Universidade do Minho, Portugal

Jorge Soares, Universidade Federal do Ceará, Brasil

Jose Adam, Universitat Politècnica de València, Espanha

José Teixeira, Universidade do Minho, Portugal

José Vieira, Universidade do Minho, Portugal

José Valente, Universidade do Porto, Portugal

José Marques, Universidade de Coimbra, Portugal

José Matos, Universidade de Lisboa, Portugal

José Mendes, Universidade do Minho, Portugal

José Catarino, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal

José Luís Pinho, Universidade do Minho, Portugal

Juan Marriaga, Universidad Nacional de Colombia, Colômbia

Khosrow Ghavami, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Brasil

Lígia Silva, Universidade do Minho, Portugal

Luis Loria-Salazar, Universidad de Costa Rica, Costa Rica

Luís Lopes, Universidade do Minho, Portugal

Luís Simões da Silva, Universidade de Coimbra, Portugal

Luís Picado Santos, Universidade de Lisboa, Portugal

Maisa Tobias, Universidade Federal do Pará, Brasil

Manuel Matos Fernandes, Universidade do Porto, Portugal

Marcial Blondet, Pontificia Universidad Católica del Perú, Peru
Márcio Farias, Universidade de Brasília, Brasil
Maria Almeida, Universidade do Minho, Portugal
Maria Bortolucci, Universidade Federal de São Carlos, Brasil
Maria Antunes, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal
Maria Jacques, Universidade de Brasília, Brasil
Marta Pagola, Universidad Nacional de Rosario, Argentina
Miguel Angel del Val, Universidad Politécnica de Madrid, Espanha
Naim Haie, Universidade do Minho, Portugal
Newsha Ajami, University of Stanford, USA
Normando Perazzo, Universidade Federal da Paraíba, Brasil
Paulo Lourenço, Universidade do Minho, Portugal
Paulo Vila Real, Universidade de Aveiro, Portugal
Resende Nsambu, Universidade Agostinho Neto, Angola
Ricardo Fakury, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil
Rodrigo Alvarado, Universidad del Bío-Bío, Chile
Rui Ramos, Universidade do Minho, Portugal
Said Jalali, Universidade do Minho, Portugal
Tan Yigitcanlar, University of Queensland, Australia
Teresa Barbosa, Universidade Federal de Juiz de Fora, Brasil
Vasco Freitas, Universidade do Porto, Portugal
Vladimir Benincasa, Universidade Federal de São Carlos, Brasil

O volume inclui alguns dos melhores trabalhos apresentados no Congresso Construção 2022, organizado pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho.

Produção Editorial

Apoio Editorial: Vítor Costa, Centro de Território, Ambiente e Construção, Universidade do Minho, Portugal

Design da Capa: Vítor Costa

URL: <https://revistas.uminho.pt/>

E-mail: revistaengenhariacivil@civil.uminho.pt

Centro de Território, Ambiente e Construção
Departamento de Engenharia Civil
Universidade do Minho
Campus de Azurém
4800-058 Guimarães - Portugal

© Autores / Centro de Território, Ambiente e Construção



Este trabalho está licenciado com uma Licença [Creative Commons - Atribuição 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

e-ISSN: 2795-5982 | **ISSN:** 0873-1152

A Engenharia Civil UM é financiada por fundos nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P., no âmbito do Projeto UIDB/04047/2020 (financiamento base) e UIDP/04047/2020 (financiamento programático).



Artigos publicados

Perfil tendencial de comportamento dos ocupantes em caso de incêndio

E.C. Cordeiro, A.L. Coelho, M.C.S. Nepomuceno

6

Avaliação experimental de tensões geradas num sistema de colagem de cerâmica sob ação de gradientes térmicos

L. Silva, P. Sequeira, A. Flores, N. Viriato, F.Q. Melo, M.A. Vaz

19

Melhoria de desempenho do ETICS, com base em lã mineral, por homogeneização da superfície de interação entre componentes

D. Cardoso, I. Flores-Colen, M.F.C. Pereira, P. Ferreira, P. Sequeira, L. Silva

33

Propriedades de betão drenante em misturas com agregados reciclados

J.M.C.B. Ximenes, J.L.B. Aguiar, C.M.G. Jesus, J.C. Pais, V. Uher

43

Micro-indicadores de Circularidade para o Setor de Construção Civil na Perspetiva de Produtos Plásticos

J. Matos, C.I. Martins, C.L. Simões, R. Simões

56

Medição Contínua do Teor de Humidade em Materiais de Construção Consolidados com a Técnica Time-Domain Reflectometry

T.S. Freitas, A.S. Guimarães, S.Roels, V.P. de Freitas, A. Cataldo

67

Perfil tendencial de comportamento dos ocupantes em caso de incêndio

Tendency-based behavioural profile of occupants in case of fire

E.C. Cordeiro^{a†}, A.L. Coelho^b, M.C.S. Nepomuceno^{cd}

^a *Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal*

^b *Universidade Lusófona, Porto, Portugal*

^c *Universidade da Beira Interior, C-MADE, Covilhã, Portugal*

^d *Lab2PT, Guimarães, Portugal*

[†] *Autor para correspondência: eccordeiro@lneec.pt*

RESUMO

A importância do comportamento humano em situações de evacuação é reconhecida por todos os que de algum modo estão relacionados com a segurança contra incêndios em edifícios, como é comprovado pelo elevado número de estudos e projetos de investigação que têm sido desenvolvidos. Nesta comunicação apresentam-se os resultados de um projeto de investigação, que deu origem a uma tese de doutoramento, cujo objetivo foi o de prever esse comportamento e analisar os fatores que mais fortemente o condicionam. Nesse trabalho, a informação que suporta as conclusões foi obtida a partir de 4 tipos de inquéritos destinados a pessoas distintas (pessoas que viveram uma situação de incêndio, pessoas que participaram em exercícios de evacuação, pessoas no geral e bombeiros que estiveram envolvidos nas operações de combate e salvamento). No total obtiveram-se mais de mil inquéritos convenientemente preenchidos, a partir dos quais, e após uma análise e tratamento estatístico, foi criado um perfil tendencial de comportamento dos ocupantes em caso de incêndio. Com recurso a um modelo de simulação de evacuação foi avaliado o impacto desse perfil no tempo total de evacuação em diferentes edifícios que foram desenhados especificamente para o estudo. Nesta comunicação apresentam-se os resultados fundamentais desse estudo, incluindo as conclusões sobre o que importa alterar em termos metodológicos de abordagem do tema de modo que se possa incorporar, no futuro, o conhecimento adquirido com este trabalho.

ABSTRACT

The importance of human behaviour in evacuation situations is recognized by all those who are in any way involved in fire safety in buildings, as evidenced by the high number of studies and research projects that have been developed. This communication presents the results of a research project that resulted in a doctoral thesis, whose objective was to predict this behaviour and analyse the factors that most strongly influence it. In this work, the information supporting the conclusions was obtained from 4 types of surveys targeting different groups of people (individuals who have experienced a fire situation, participants in evacuation exercises, the general public, and firefighters involved in firefighting and rescue operations). In total, over a thousand surveys were appropriately filled out, from which, after analysis and statistical treatment, a trending profile of occupants' behaviour in case of fire was created. Using an evacuation simulation model, the impact of this profile on the total evacuation time was evaluated in different buildings that were specifically designed for the study. This communication presents the fundamental results of this study, including conclusions on what needs to be methodologically changed in approaching the topic to incorporate the knowledge acquired from this work in the future.

Palavras-chave:

Comportamento Humano;
Evacuação;
Incêndio.

Keywords:

Human Behavior;
Evacuation; Fire.

1. Introdução

O comportamento humano é a aplicação prática da decisão tomada, traduzindo-se num conjunto de procedimentos ou reações do indivíduo ao ambiente que o cerca durante um determinado período de tempo (Figura 1).



Figura 1 - Comportamento humano.

Ao indivíduo, são atribuídos determinados atributos que tornam possível a sua caracterização. Quanto ao ambiente, é tudo o que rodeia o indivíduo, no contexto em que este está inserido. O tempo é o período durante o qual o indivíduo está exposto a esse ambiente ou o tempo necessário para concretizar as ações que constituem o comportamento perante um estímulo [1-4].

Analisando a definição anterior sobre o comportamento humano numa situação de evacuação, constata-se que ele é influenciado pelo “ambiente” (edifício, o incêndio e outros ocupantes), pelo “tempo” (tempo decorrido entre o instante em que o ocupante recebe os primeiros estímulos provenientes do ambiente e o instante em que ele se encontra em segurança, no exterior do edifício) e pelas variáveis do próprio “indivíduo”, nomeadamente as físicas (idade, género, limitação sensorial e estatura física), as fisiológicas (saúde, cansaço, tipo de vida, efeitos de álcool, drogas ou medicamentos) e, ainda, as psicológicas (experiência, atitude, estado emocional, formação, estado mental) [5]. Dos vários estudos sobre o comportamento humano em caso de incêndio, realçam-se as seguintes conclusões [6-19]:

- ✓ Os ocupantes tendem a usar os caminhos habituais, especialmente se não conhecem o edifício;
- ✓ Os ocupantes evitam zonas com fumo ou incêndio para abandonar o edifício;
- ✓ Os ocupantes seguem outros ocupantes;
- ✓ Os ocupantes comportam-se, muitas vezes, de maneira altruísta em situações de crise;
- ✓ A presença de liderança e de organização aumenta o comportamento adequado;
- ✓ Os ocupantes com mais formação agem de maneira muito mais racional;
- ✓ Pode haver diferença entre a atuação da mulher e do homem;
- ✓ Não há evidências de pânico perante uma situação de incêndio;
- ✓ Há um sentimento de segurança com a chegada dos meios de segurança;
- ✓ A experiência anterior pode alterar comportamentos perante uma nova situação;
- ✓ Os estímulos podem ser diversos e apenas um pode não ser suficiente para o ocupante abandonar de imediato o edifício;
- ✓ Quanto maior o número de pistas identificadas pelos ocupantes, maior é o impacto no comportamento;
- ✓ São realizadas atividades antes de abandonar o edifício, tais como, procurar informação do que está a acontecer, recolher os pertences ou fornecer informação verbal para abandonar o local;
- ✓ As mensagens de alarme são importantes para o início da evacuação;
- ✓ A presença de fumo faz com que ocupantes voltem para trás;
- ✓ Nem sempre os ocupantes sabem onde se localiza o incêndio ou qual é a emergência;
- ✓ Os ocupantes reentram no edifício após abandonar o mesmo;
- ✓ O tempo de reconhecimento é um dos fatores mais importantes do comportamento humano.

Relativamente aos modelos que tentam simular o comportamento humano no processo de evacuação, verifica-se que o fazem de um modo simplificado, dependendo da informação que o utilizador fornece ao modelo, informação essa que não tem sido até agora suportada por estudos

que a fundamentem, nomeadamente no que diz respeito a tempos gastos com ações que não têm como objetivo a saída para o exterior do edifício [20-23].

A representação do comportamento nos modelos de evacuação de edifícios em caso de incêndio é muito limitada, devido principalmente à ausência da simulação do processo cognitivo do ocupante durante a situação de emergência [24, 25]. A este respeito, salientam-se as seguintes conclusões Lovreglio *et al.* [26]:

- ✓ O comportamento humano em caso de incêndio tem especificidades que variam de país para país, devido às características das suas populações serem distintas;
- ✓ A consolidação do conhecimento sobre o comportamento humano em caso de incêndio está ainda longe de estar estabilizada;
- ✓ A não consolidação do conhecimento nesta área decorre da natureza do evento em causa e da dificuldade de obter dados em situações reais;
- ✓ A utilização de Jogos Sérios para obter dados sobre o comportamento dos ocupantes em caso de incêndio é uma abordagem que poderá enriquecer o conhecimento, permitindo aperfeiçoar os perfis comportamentais;
- ✓ Inexistência de estudos que permitem quantificar o tempo associado às ações que os ocupantes realizam antes de decidirem abandonar o edifício;
- ✓ O tempo que os ocupantes gastam para realizar as diversas ações antes de decidirem abandonar o edifício, resultantes do seu comportamento ao incêndio, podem representar uma parte significativa do tempo total de evacuação.

2. Resultados

Como anteriormente referido, o comportamento humano depende das características dos ocupantes, do ambiente que se estabelece no decurso do incêndio no interior do edifício e, ainda, do espaço temporal durante o qual ocorre o incêndio. Com o objetivo de compreender o comportamento dos ocupantes e determinar quais os fatores que o influenciam, foram criados 4 inquéritos. O primeiro, designado de inquérito Tipo 1, teve como público-alvo as pessoas que estiveram envolvidas em incêndios. Quanto ao inquérito Tipo 2, é o resultado do aperfeiçoamento de um outro que já foi objeto de aplicação no âmbito da dissertação de mestrado desenvolvida por Elisabete Cordeiro [27], que na altura registou cerca de 300 respostas, tendo a consequente análise das respostas evidenciado algumas insuficiências do inquérito em causa. Um terceiro inquérito, com a designação Tipo 3, destinou-se a pessoas que participaram em simulacros. Finalmente, foi desenvolvido um quarto inquérito, designado de Tipo 4, destinado exclusivamente a bombeiros que tivessem participado em ações de combate a incêndios urbanos.

Tabela 1 - Inquéritos.

Inquéritos	Nº de inquéritos distribuídos	Nº de inquéritos recebidos	Percentagem de inquéritos recebidos	
Tipo 1	Indústria	50	22	44%
	Habitação Amadora	20	4	20%
	Habitação Trofa	16	3	19%
Tipo 2	Público em geral**	*	1051	NA
Tipo 3	Exercícios	400	141	35%
	Exercícios	*	26	NA
Tipo 4	Bombeiros	***	34	NA
Total			1281	

* Divulgação através das redes sociais. Impossível quantificar o número de inquéritos distribuídos no total.

** Dos 1051 inquéritos recebidos, 359 foram respondidos diretamente através da plataforma Google para inquéritos em 2015 e 403 em 2021. Os restantes foram entregues em papel.

*** Distribuídos pelas principais corporações de bombeiros do País via email.

NA: Não Aplicável.

Com o objetivo de compreender o comportamento dos ocupantes e determinar quais os fatores que o influenciam, recorreu-se à análise inferencial para testar as diversas hipóteses

criadas. No essencial, pretendeu-se obter novos conhecimentos sobre diversos aspetos relacionados com o comportamento das pessoas, com destaque para os seguintes:

- ✓ Pânico, ou não, dos ocupantes e fatores que determinam a sua ocorrência;
- ✓ Entrelajada entre ocupantes e fatores que determinam a sua ocorrência;
- ✓ Capacidade de identificarem o sinal de alarme e fatores que determinam essa capacidade;
- ✓ Interpretação do sinal de alarme e fatores que determinam essa interpretação;
- ✓ Reação dos ocupantes ao sinal de alarme e fatores que determinam essa reação;
- ✓ Influência da ligação do ocupante ao edifício na reação ao sinal de alarme;
- ✓ Acontecimentos que chamam a atenção do ocupante quando algo de invulgar está a acontecer e fatores que determinam esse alerta;
- ✓ Ações realizadas pelos ocupantes após tomarem consciência de que algo de anormal está a ocorrer e fatores que determinam a concretização dessas ações;
- ✓ Efeito do aconselhamento no abandono do edifício e fatores que determinam a reação a esse conselho;
- ✓ Fatores que influenciam a realização de tarefas pelos ocupantes, antes de decidirem abandonar o edifício;
- ✓ Reações dos ocupantes quando se deparam com fumo e fatores que determinam essas reações;
- ✓ Reações dos ocupantes ao se deparam com o incêndio e fatores que determinam essas reações;
- ✓ Caminho escolhido pelos ocupantes para deixar o edifício e fatores que determinam a sua escolha;
- ✓ Tendência para seguir outros ocupantes em edifícios que não conhece e fatores que determinam esse comportamento;
- ✓ Recolha de bens pessoais pelos ocupantes antes de abandonarem o edifício e fatores que determinam esse comportamento;
- ✓ Reentrada dos ocupantes no edifício e fatores que determinam esse comportamento;
- ✓ Consequências do incêndio que mais assustam os ocupantes e fatores que determinam essa reação de medo;
- ✓ Recolha de viatura antes de abandonar o edifício e fatores que determinam esse comportamento.
- ✓ Quantificação dos tempos de atraso na evacuação.

2.1. *Comportamento humano em caso de incêndio*

A análise das respostas ao inquérito Tipo 2 evidenciou que a tendência prevalecente das pessoas é a de considerarem que, de uma forma geral, existe pânico numa situação de incêndio. Estes resultados foram confirmados pelas respostas aos inquéritos Tipo 1 e Tipo 4, com as limitações inerentes à dimensão da amostra relativa a essas respostas, pelo que se pode considerar que o pânico ocorre numa situação de incêndio. Importa, no entanto, ter presente que o pânico neste estudo foi interpretado pelos inquiridos como uma, ou mais, das seguintes manifestações:

- ✓ Agitação;
- ✓ Ansiedade;
- ✓ Choro e negação relativamente ao que estava a acontecer;
- ✓ Desespero devido à existência de ocupantes no interior onde se incluíam crianças;
- ✓ Desorientação;
- ✓ Estado de choque;
- ✓ Estado de excitação, alteração de voz e repetição de movimentos;
- ✓ Medo de perderem o emprego;
- ✓ Medo;
- ✓ Nervosos.

O **pânico** pode ocorrer numa situação de incêndio, mas com as respostas provenientes do inquérito não foi possível indicar quais as pessoas que manifestaram este estado. A informação

que foi possível retirar é que, independentemente da faixa etária (FE), do gênero, das habilitações literárias (HL) e da formação em segurança contra incêndios (FSCI), as pessoas consideram que haverá pânico numa situação de incêndio.

A análise das respostas ao inquérito Tipo 2 sobre **interajuda**, evidenciou que a tendência prevalecente das pessoas é a de considerarem que existe o espírito de interajuda numa situação de incêndio, independentemente da FE, do gênero, das HL e da FSCI, sendo a ajuda a terceiros um dos motivos para reentrar num edifício, após o ter abandonado.

Analizando as respostas ao inquérito Tipo 2 sobre a **identificação do sinal de alarme**, verificou-se que a tendência prevalecente das pessoas é a de considerarem que nem todas identificam o sinal de alarme, constatando-se que a FE, as HL, o gênero e a FSCI poderão influenciar a capacidade de identificar o referido um sinal. As pessoas de mais idade, ou sem FSCI, ou do gênero feminino, evidenciaram ter mais dificuldade em identificar o sinal de alarme.

Sobre a **interpretação do sinal de alarme**, as respostas ao inquérito Tipo 2 evidenciou que a tendência prevalecente das pessoas é a de interpretarem o sinal de alarme como correspondendo a um incêndio, constatando-se que a FE, o gênero, as HL e a FSCI poderão ter influência na interpretação que é feita. Contudo, a análise da informação proveniente do inquérito Tipo 1 (indústria) e do inquérito Tipo 3, não confirmou a influência da FE, do gênero, das HL e da FSCI na interpretação do sinal de alarme. Há que salientar que no caso do exercício de evacuação (Tipo 3), o conhecimento da realização do mesmo influenciou a interpretação do sinal de alarme, isto porque a generalidade dos inquiridos interpretou esse sinal como correspondendo a um exercício de evacuação e não a um incêndio.

Outra informação relevante é se as atividades que os ocupantes estão a desenvolver podem ter influência na interpretação do sinal de alarme. Tanto no caso dos exercícios (inquérito Tipo 3), como do incêndio real (inquérito Tipo 1), verificou-se que a interpretação do sinal de alarme não é afetada pela atividade que os ocupantes estão a fazer no momento em que tomam conhecimento desse sinal. Refere-se, finalmente, que o sinal de alarme nem sempre é suficiente para que os inquiridos saibam o que está a ocorrer, facto que é fundamental para os ocupantes terem uma reação adequada à situação.

A análise das respostas ao inquérito Tipo 2 sobre a **reação ao sinal de alarme** evidenciou que a tendência prevalecente das pessoas é a de procurarem saber o que se passa, constatando-se que a FSCI poderá ter influência na reação ao sinal de alarme. Da informação proveniente do inquérito Tipo 1 (Indústria), a reação mais indicada foi “deixar o local para sair do edifício”, não tendo sido indicado nenhuma vez “procurar saber o que se passa”. Nos exercícios (inquérito Tipo 3), mais uma vez, a reação mais indicada foi “deixar o local para sair do edifício”. A reação ao sinal de alarme poderá ser influenciada pela interpretação que é feita do mesmo e nem sempre o sinal de alarme, por si só, é suficiente para que as pessoas abandonem o edifício.

Analizando as respostas ao inquérito Tipo 2 sobre **alertar os ocupantes**, verificou-se que a tendência prevalecente das pessoas é a de considerarem que o alarme é o meio preferencial para indicar que algo de invulgar está a ocorrer. A informação obtida a partir dos inquéritos relacionados com situações reais de incêndio indicia que essa informação, por si só, pode não ser suficiente. De facto, embora as pessoas possam indicar que o alarme foi o responsável pelo alerta, uma análise mais detalhada evidenciou a influência de outros fatores relacionados com o incêndio.

Sobre a **ação realizada pelos inquiridos**, as respostas ao inquérito Tipo 2 evidenciaram que, quando confrontadas com uma situação anormal, procuram sobretudo “investigar o que estaria a acontecer” e “abandonar o local por iniciativa própria”, e que essas ações são independentes da FE, do gênero, das HL e da FSCI. Já nos inquéritos relativos a situações de incêndio e a exercícios de evacuação, constata-se que a resposta mais indicada foi interromper o que estava a fazer para abandonar o edifício, independentemente da FE, do gênero, das HL e da FSCI. A ação mais frequente perante o conhecimento de que algo de anormal está a acontecer será abandonar o edifício, não sendo essa ação influenciada pela FE, pelo gênero, pelas HL e pela FSCI das pessoas que estão a viver a situação. Contudo, há evidências de que apesar de as pessoas indicarem que irão abandonar o edifício, poderão efetuar diversas tarefas antes de concretizarem essa ação.

A análise das respostas ao inquérito Tipo 2 sobre **abandonar por indicação**, evidenciou que a tendência prevalecente das pessoas é a de abandonarem o edifício sem aguardar que alguém

lhes peça para o fazerem. Contudo, os resultados dos inquéritos do Tipo 1 e do Tipo 3 mostram uma realidade que pode ser ligeiramente diferente, pois apesar de as pessoas ouvirem o sinal, poderão aguardar que alguém (ou o sistema de voz) lhes peça para abandonarem o edifício. O alarme por si só poderá não ser suficiente para que todos os ocupantes decidam abandonar o edifício, podendo existir alguns que só o fazem após a recomendação de alguém.

Analisando as respostas ao inquérito Tipo 2 sobre a **realização de tarefas antes de abandonar o edifício**, verificou-se que a tendência prevalecente das pessoas é a de realizarem uma ou mais tarefas antes de abandonarem o edifício, com destaque para o combate ao incêndio e ligar para avisar outros ocupantes.

A análise das respostas ao inquérito Tipo 2 sobre a **reação ao fumo** evidenciou que a tendência prevalecente das pessoas é a de tentarem encontrar outro caminho para abandonar o edifício. Contudo, esta tendência não foi confirmada pelos resultados dos inquéritos do Tipo 1, pois os ocupantes seguiram o caminho que estavam a percorrer. Esta reação irá depender em muito de como estará o caminho e se existem caminhos alternativos. Os ocupantes poderão ou não procurar caminhos alternativos ao se depararem com a presença de fumo proveniente do incêndio, dependendo das condições do caminho que estarão a percorrer e também poderá ser influenciado pelo género e se têm ou não FSCI.

Sobre a **reação ao deparar com o incêndio**, da análise das respostas ao inquérito Tipo 2 verificou-se que a tendência prevalecente das pessoas é a de tentarem outro caminho para abandonar o edifício. A análise das respostas ao inquérito Tipo 1 não confirma a tendência anterior, pois a grande maioria dos inquiridos que se depararam com o incêndio, continuaram a seguir o caminho que estavam a percorrer. Os ocupantes poderão ou não procurar caminhos alternativos, mas isso dependerá das condições do caminho que estarão a percorrer, sendo o género masculino mais propício a combater o incêndio e o género feminino a pedir ajuda.

A análise das respostas ao inquérito Tipo 2 sobre o **caminho para abandonar o edifício**, evidenciou que a tendência prevalecente das pessoas é seguirem a sinalização para abandonarem o edifício, independentemente da localização. Há ainda uma percentagem significativa que escolheria, para abandonar o edifício, o caminho que utilizou para entrar. A análise evidenciou ainda que a escolha do caminho pode ser influenciada pela FE, pelo género, pelas HL, pela FSCI e, ainda, pelo piso onde se encontra (piso inferior ao plano de referência, piso no plano de referência, ou piso acima do plano de referência). Analisando os resultados provenientes dos inquéritos Tipo 1 e Tipo 3, verifica-se que a grande maioria dos inquiridos utilizou o caminho normal e que a atividade desenvolvida pelos ocupantes no momento em que tomam conhecimento do ocorrido pode influenciar a escolha. Além disso, também se verifica que os ocupantes não associam o caminho normal com uma saída de emergência.

Analisando as respostas ao inquérito Tipo 2 sobre **seguir outros**, verificou-se que a tendência prevalecente das pessoas é a de seguirem outras, caso estejam num edifício que não conheçam, sendo que o género e a FSCI podem influenciar seguir outros ou não, isto é, o género feminino é mais propício a seguir outros, bem como as pessoas sem FSCI.

Sobre **recolher bens antes de abandonar o edifício**, a análise das respostas ao inquérito Tipo 2 evidenciou que a tendência prevalecente das pessoas é a de não recolherem os seus bens antes de abandonar o edifício, sendo essa decisão independente da FE, do género, das HL e da FSCI. Tal tendência não foi confirmada pelos resultados da análise aos inquéritos do Tipo 1 e Tipo 3, pois dessa análise constata-se que antes de abandonar o edifício, os inquiridos recolhem os seus bens, verificando-se diferença caso se trate de um incêndio ou exercício, isto é, é proporcionalmente inverso. Os bombeiros confirmam que os ocupantes tentam retirar os seus bens do edifício.

A análise das respostas ao inquérito Tipo 2 sobre o **voltar a reentrar no edifício** evidenciou que a tendência prevalecente das pessoas é de reentrar no edifício sem autorização, nomeadamente para ajudar terceiros, independentemente da FE, do género, das HL e da FSCI. Analisando a informação proveniente do inquérito Tipo 1, verifica-se que são poucos os inquiridos que reentraram no edifício, informação que não é confirmada pelo inquérito Tipo 4, pois neste a maioria tenta reentrar sem autorização.

2.2. Tempos de atraso na evacuação

O tempo de evacuação pode ser dividido em 3 tempos, sendo eles: a) o tempo decorrido entre o instante em que o ocupante tem conhecimento do incêndio e aquele em que decide deixar o edifício; b) o tempo que necessita para efetuar tarefas e c) o tempo de movimento.

A análise das respostas ao inquérito Tipo 1 evidenciou que vários inquiridos demoraram entre 1 a 3 minutos entre o momento em que tiveram consciência de que algo estava a acontecer e aquele em que decidiram abandonar o edifício, mas também houve quem tivesse demorado mais do que 5 minutos. Relativamente ao tempo para a realização das tarefas, verificou-se que vários inquiridos demoraram menos do que 1 minuto, outros entre 3 a 5 minutos e alguns mais do que 5 minutos. Por fim, no que respeita ao tempo decorrido entre o instante em que tiveram consciência de que algo estava a acontecer e aquele em que saíram do edifício, a análise ao inquérito Tipo 1 evidenciou que vários inquiridos demoraram entre 2 e 5 minutos, embora haja indicação de que poderão ter demorado mais de 8 minutos. Subtraindo o tempo para realização das tarefas ao tempo decorrido entre o instante em que tiveram consciência de que algo estava a acontecer e aquele em que saíram do edifício, verifica-se que o tempo da realização das tarefas pode representar em média 50% do tempo total de evacuação.

2.3. Perfil Comportamental

Um dos objetivos iniciais desta investigação era a criação de perfis comportamentais, perante uma situação de incêndio. Como o número de respostas aos inquéritos (Tipo 1, Tipo 2 e Tipo 3) que permitiriam concretizar esse modelo comportamental foi reduzido, optou-se por criar tendências¹ de comportamento dos ocupantes (Modelo de tendências comportamentais dos ocupantes – MTO) com base nas respostas obtidas aos referidos inquéritos. Assim, no que se refere à interpretação e ações relatadas pelos inquiridos (inquérito Tipo 1, Tipo 2 e Tipo 3), as tendências foram as seguintes:

- ✓ Interpretação dada ao sinal de alarme:
 - Operações de manutenção do sistema: 9,0%
 - Exercício de evacuação: 15,7%
 - Falso Alarme: 18,1%
 - Incêndio real: 48,0%
 - Outra: 9,2%.
- ✓ Reação ao sinal de alarme:
 - Nenhuma: 7,7%
 - Deixa o local onde está para sair do edifício: 23,3%
 - Avisa terceiros para deixar o edifício: 8,7%
 - Aconselha terceiros a continuarem a sua atividade: 0,9%
 - Contacta os bombeiros: 3,8%
 - Procura saber o que se passa (telefona para a segurança, abre a porta para ver algo relacionado com o alarme, ...): 50,7%
 - Outra: 4,9%.
- ✓ Abandona o edifício somente se lhe dizem para o fazer:
 - Sim: 73,0%.
- ✓ Efetua tarefas antes de abandonar o edifício:
 - Sim: 93,0%.
- ✓ Reação ao deparar com fumo quando está a abandonar o edifício:
 - Investigar por curiosidade: 2%
 - Voltar para trás: 4%
 - Tentar outro caminho: 71%
 - Investigar para combater o incêndio: 23%.
- ✓ Reação ao deparar com o incêndio quando está a abandonar o edifício:

¹ Estas tendências apresentam as limitações decorrentes da informação limitada que a suporta, tornando-se necessário estudos subsequentes que permitam obter informação adicional a partir da qual poderá, então, desenvolver-se o referido modelo comportamental.

- Tentar combater o incêndio: 21,5%
- Voltar para trás: 2,8%
- Tentar outro caminho: 54,9%
- Pedir ajuda: 20,8%.
- ✓ Caminho que utiliza para abandonar o edifício:
 - Caminho que usa normalmente: 66%
 - Recorre à saída mais próxima: 34%.

No que se refere aos tempos associados à tomada de decisão e à execução das tarefas, as tendências foram concretizadas com base nas respostas ao inquérito Tipo 1 e ao inquérito Tipo 3, tendo resultado os tempos e percentagens a seguir indicadas:

- ✓ Tempos de decisão:
 - Menos do que 1 minuto: 25%
 - Entre 1 minuto e 3 minutos: 49,4%
 - Entre 3 minutos e 5 minutos: 20,2%
 - Mais do que 5 minutos: 5,4%
- ✓ Tempos para realização de tarefa:
 - 0 minutos: 7%
 - Menos do que 1 minuto: 8%
 - Entre 1 minuto e 3 minutos: 59%
 - Entre 3 minutos e 5 minutos: 17%
 - Mais do que 5 minutos: 8%.

3. Simulações

Com base nas tendências anteriormente indicadas, foi criada uma aplicação com recurso ao *Excel* e programação *Visual Basic for Applications* (VBA) que permite quantificar as tendências comportamentais dos ocupantes que constituem o efetivo de um edifício. No sentido de verificar a influência desse MTO no tempo total de evacuação, recorreu-se ao *software Pathfinder* para simular a evacuação em 5 edifícios distintos, tendo sido criadas 3 simulações para cada arquitetura.

Na criação das arquiteturas dos edifícios foram tidas em consideração as exigências regulamentares da Portaria 1532/2008 de 29 de dezembro (na sua atual redação). Quatro das arquiteturas apresentam o mesmo efetivo total (1000 pessoas), estando a diferença nas áreas e no número de pisos, de acordo com o descrito a seguir:

- ✓ Arquitetura 1
 - Efetivo total: 1000
 - Pisos: 1
 - Área: 1000 m²
- ✓ Arquitetura 2
 - Efetivo total: 1000
 - Efetivo por piso: 500
 - Pisos: 2
 - Área por piso: 500 m²
- ✓ Arquitetura 3
 - Efetivo total: 1000
 - Efetivo por piso: 250
 - Pisos: 4
 - Área por piso: 500 m²
- ✓ Arquitetura 4
 - Efetivo total: 1000
 - Efetivo por piso: 125
 - Pisos: 8
 - Área por piso: 500 m²

O desenvolvimento destas 4 arquiteturas teve como objetivo verificar se os tempos de atraso têm o mesmo impacto no tempo de evacuação do edifício, caso haja, ou não, vias verticais

de evacuação. Por fim a arquitetura 5 é referente a um hipermercado e resultou de uma adaptação de uma arquitetura disponível, gratuitamente, na *internet*²:

- ✓ Arquitetura 5
 - Efetivo total: 1825
 - Pisos: 1
 - Área por piso: 6026 m²

Foram criadas 3 simulações distintas no *Pathfinder*, com as seguintes diferenças entre elas:

- ✓ Simulação 1: não foi previsto qualquer aspeto comportamental. Assim, os ocupantes iniciam a evacuação logo que é iniciada a simulação. A escolha dos caminhos é feita em função da proximidade às saídas. No entanto, quando o tempo de espera numa fila formada junto da saída inicialmente escolhida for superior ao tempo de deslocamento para outra saída, essa outra saída é escolhida.
- ✓ Simulação 2: foi inserido um tempo de espera (tempo de decisão) com base nas tendências criadas no âmbito desta investigação. A escolha da saída é ditada pela zona de influência, caso exista uma saída na proximidade. Se isso não se verificar, a escolha é feita com base nas tendências anteriormente referidas.
- ✓ Simulação 3: esta simulação difere da anterior, pelo facto de incorporar, ainda, um tempo de espera referente à realização de tarefas, baseado nas tendências criadas no âmbito desta investigação.

A distribuição dos ocupantes pelos pisos, realizada pelo *Pathfinder*, nas várias simulações concretizadas, foi aleatória. No caso da Simulação 2 e da Simulação 3, o MTO permite determinar um conjunto de informação que foi inserida no *Pathfinder*, isto é:

- ✓ Número de ocupantes associado a cada intervalo de tempo relativo à tomada de decisão;
- ✓ Número de ocupantes associado a cada intervalo de tempo relativo à execução de tarefas.

As simulações realizadas conduziram aos seguintes resultados:

- ✓ Simulação 1: não foi previsto o aspeto comportamental, os ocupantes seguem as regras básicas do *Pathfinder*, que distribui o efetivo pelos pisos de modo aleatório, encaminhando-os para a saída mais próxima, opção que pode ser alterada no decurso da simulação perante eventuais congestionamentos dessas saídas.
- ✓ Simulação 2: foi previsto o aspeto comportamental relacionado com a decisão dos ocupantes perante o conhecimento do incêndio, tendo sido introduzidos 4 tempos de atraso: 0 a 60 segundos, 61 a 180 segundos, 181 a 300 segundos e 301 a 480 segundos. De seguida, mediante a aplicação do MTO, fez-se a distribuição dos 1000 ocupantes nas 4 primeiras arquiteturas, tendo resultado a seguinte distribuição no tempo de atraso (tempo de decisão):
 - 0 a 60 segundos: 250 ocupantes
 - 61 a 180 segundos: 494 ocupantes
 - 181 a 300 segundos: 202 ocupantes
 - 301 a 480 segundos: 54 ocupantes

Quanto à arquitetura 5, referente ao supermercado, a distribuição foi a seguinte:

- 0 a 60 segundos: 456 ocupantes
- 61 a 180 segundos: 902 ocupantes
- 181 a 300 segundos: 369 ocupantes
- 301 a 480 segundos: 98 ocupantes
- ✓ Simulação 3: Além do tempo de atraso referido anteriormente (tempo de decisão), foi também considerado o tempo referente às tarefas, tendo sido introduzidos 5 tempos de atraso: 0 segundos, 0 a 60 segundos, 61 a 180 segundos, 181 a 300 segundos e 301 a 480 segundos. Para cada comportamento associado ao tempo de decisão, foi feita uma distribuição dos ocupantes

² <https://dwgmodels.com/54-supermarket-1.html>

seguinto a distribuição dos tempos das tarefas:

- 0 a 60 segundos: 250 ocupantes
 - 0 minutos: 18 ocupantes
 - Menos do que 1 minuto: 21 ocupantes
 - Entre 1 minuto e 3 minutos: 148 ocupantes
 - Entre 3 minutos e 5 minutos: 42 ocupantes
 - Mais do que 5 minutos: 21 ocupantes.
- 61 a 180 segundos: 494 ocupantes
 - 0 minutos: 35 ocupantes
 - Menos do que 1 minuto: 42 ocupantes
 - Entre 1 minuto e 3 minutos: 292 ocupantes
 - Entre 3 minutos e 5 minutos: 84 ocupantes
 - Mais do que 5 minutos: 42 ocupantes.
- 181 a 300 segundos: 202 ocupantes
 - 0 minutos: 14 ocupantes
 - Menos do que 1 minuto: 17 ocupantes
 - Entre 1 minuto e 3 minutos: 120 ocupantes
 - Entre 3 minutos e 5 minutos: 34 ocupantes
 - Mais do que 5 minutos: 17 ocupantes.
- 301 a 480 segundos: 54 ocupantes
 - 0 minutos: 4 ocupantes
 - Menos do que 1 minuto: 5 ocupantes
 - Entre 1 minuto e 3 minutos: 32 ocupantes
 - Entre 3 minutos e 5 minutos: 9 ocupantes
 - Mais do que 5 minutos: 5 ocupantes.

Quanto à arquitetura 5, referente ao supermercado, a distribuição foi a seguinte:

- 0 a 60 segundos: 456 ocupantes
 - 0 minutos: 32 ocupantes
 - Menos do que 1 minuto: 39 ocupantes
 - Entre 1 minuto e 3 minutos: 270 ocupantes
 - Entre 3 minutos e 5 minutos: 77 ocupantes
 - Mais do que 5 minutos: 39 ocupantes.
- 61 a 180 segundos: 902 ocupantes
 - 0 minutos: 63 ocupantes
 - Menos do que 1 minuto: 76 ocupantes
 - Entre 1 minuto e 3 minutos: 534 ocupantes
 - Entre 3 minutos e 5 minutos: 153 ocupantes
 - Mais do que 5 minutos: 76 ocupantes.
- 181 a 300 segundos: 369 ocupantes
 - 0 minutos: 26 ocupantes
 - Menos do que 1 minuto: 31 ocupantes
 - Entre 1 minuto e 3 minutos: 218 ocupantes
 - Entre 3 minutos e 5 minutos: 62 ocupantes
 - Mais do que 5 minutos: 31 ocupantes.
- 301 a 480 segundos: 98 ocupantes
 - 0 minutos: 7 ocupantes
 - Menos do que 1 minuto: 8 ocupantes
 - Entre 1 minuto e 3 minutos: 58 ocupantes
 - Entre 3 minutos e 5 minutos: 17 ocupantes
 - Mais do que 5 minutos: 8 ocupantes.

Determinadas as distribuições anteriormente indicadas para cada uma das simulações, e inseridas no *Pathfinder*, este calcula o novo tempo de evacuação, apresentando-se na tabela seguinte (Tabela 2) o resultado das 3 simulações referentes a cada arquitetura.

Tabela 2 - Tempos de evacuação das simulações.

Nome do edifício	Pisos	Efetivo	Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
			Tempo de evacuação [s]. Simulação sem tempo de decisão nem tarefa.	Tempo de evacuação [s]. Simulação com tempo de decisão.	Tempo de evacuação [s]. Simulação com tempo de decisão + tarefa.
Arquitetura 1	1	1000	169,0	487,5	969,0
Arquitetura 2	2	1000	143,5	488,8	941,3
Arquitetura 3	4	1000	408,3	512,8	789,3
Arquitetura 4	8	1000	403,3	556,0	900,8
Arquitetura 5	1	1825	142,3	573,0	973,8

Da análise da Tabela 2, consta-se que o impacto dos tempos de atraso é superior nos edifícios em que não existem vias verticais de evacuação.

4. Conclusões

No presente estudo avaliou-se o perfil tendencial de comportamento dos ocupantes em caso de incêndio. As tendências comportamentais foram fundamentadas nas respostas aos inquéritos Tipo 1, Tipo 2 e Tipo 3. Apesar do número de respostas aos inquéritos ter sido inferior ao que era esperado, nomeadamente no que se refere ao desenvolvimento do modelo comportamental, a investigação veio confirmar alguns conhecimentos empíricos que são do domínio corrente e, ainda, evidenciar outros menos conhecidos. Com recurso a um modelo de simulação de evacuação foi avaliado o impacto desse perfil no tempo total de evacuação em diferentes edifícios que foram desenhados especificamente para o estudo. Do desenvolvimento deste estudo, resultaram diversas conclusões, das quais se destacam as seguintes, umas confirmando conhecimentos já relativamente consolidados e outras que indiciam tendências comportamentais específicas do País:

- ✓ Os resultados das simulações apresentadas neste artigo, fundamentadas no MTO criado com base na amostra dos inquéritos Tipo 1, Tipo 2 e Tipo 3, mostram que o tempo de decisão, bem como o tempo referente à realização de tarefas por parte dos ocupantes, pode influenciar significativamente o tempo total de evacuação.
- ✓ O tempo de atraso poderá influenciar em muito o tempo final de evacuação, sendo que o tempo para a realização das tarefas pode representar, em média, 50% do tempo total de evacuação, verificando-se ainda que o impacto dos tempos de atraso é superior nos edifícios em que não existem vias verticais de evacuação.

Na determinação do tempo de evacuação dos edifícios a componente relativa ao comportamento dos ocupantes tem um impacto decisivo, que não deve ser ignorado, quer se recorra a um método de cálculo ou a um modelo de simulação.

De facto, os tempos obtidos sem a consideração dos aspetos comportamentais não refletem o tempo total de evacuação, sendo variável o diferencial existente e dependendo do tipo de edifício.

Referências

- [1] B. F. Skinner, *Ciência e comportamento humano*, J.C.T.R. AZZI, Trans. M. Fontes Ed., (2003).
- [2] J. P. Keating, *The Myth of Panic*. *Fire Journal*, 77, (1982).
- [3] N. R. Johnson, *Panic at the "Who Concert Stamped": An Empirical Assessment*. *Social Problems*, 34, 11, (1987).
- [4] O. Qiong, *A Brief Introduction to Perception*, *CS Canada*, 15, 10, (2017). doi:10.3968/10055
- [5] K. Lewin, *Field theory in social science: selected theoretical papers*, Edited by Dorwin Cartwright, Oxford, England: Harpers, (1951).
- [6] A. L. Coelho, *Modelação Matemática da Evacuação de Edifícios sujeitos à Acção de Um Incêndio*, Universidade do Porto, (1997).
- [7] H. Yoshimura, *Human behaviour in fires*, Paper presented at the 4th Proceedings of the Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology, Japan, (2000).
- [8] M. Antić, *Contribution Of Social Psychology For Understanding Of Human Behavior During Fire Emergency*, *Applications of Structural Fire Engineering*, (2015). doi:10.14311/asfe.2015.078
- [9] R. Fahy, G. Proulx, *Analysis of Published Accounts of the World Trade Center Evacuation*. *Federal Building and Fire Safety Investigation of the World Trade Center Disaster*, NIST NCSTAR 1-7A, (2005).
- [10] R. Fahy, G. Proulx, *Human Behavior In The World Trade Center Evacuation*, 5, (1997) 713-724.
- [11] J. Averill, D. Mileti, R. Peacock, E. Kuligowski, N. Groner, G. Proulx, H. Nelson, *Federal Investigation Of The Evacuation Of The World Trade Center On September 11, 2001*. Paper presented at the 4th International Symposium on Human Behaviour in Fire Symposium 2009, Robinson College, Cambridge, UK, July (2009) 13-15.
- [12] N. C. McConnell, K. Boyce, T. J. Shields, *An Analysis Of The Recognition And Response Behaviours Of Evacuees Of WTC 1 On 9/11*. Paper presented at the 4th International Symposium on Human Behaviour in Fire Symposium 2009, Robinson College, Cambridge, UK, July (2009) 13-15.
- [13] N. Oberijé, M. Kobes, J. Weges, J. Post, *Fire In Euroborg Football Stadium; Analysis Of Human Behaviour*, Paper presented at the 4th International Symposium on Human Behaviour in Fire Symposium 2009, Robinson College, Cambridge, UK, July (2009) 13-15.
- [14] G. Proulx, I. Reid, *Occupant Behavior and Evacuation During the Chicago Cook County Administration Building Fire*, 16 (2006) 283-309.
- [15] P. Zhang, L. Yang, S. Lo, Y. Gao, F. Dong, F. Peng, J. Jiang, *Investigations of Human Psychology and Behavior in the Emergency of Subway*, (2020).
- [16] K. Żydek, M. Król, A. Król, *Evacuation Simulation Focusing on Modeling of Disabled People Movement*, 13(4), 2405 (2021).
- [17] E. C. Cordeiro, A. Leça Coelho, M. Nepomuceno, J. Craveiro, *A modelação do comportamento dos portugueses em caso de incêndio*, *International Conference on Engineering: Engineering for Society (ICEUBI2015)*, Covilhã, Portugal, (2015).
- [18] E. Cordeiro, A. Leça Coelho, M. C. S. Nepomuceno, J. Craveiro, *Comportamento humano em caso de incêndio*, *5.as Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos (5.as JORNINC)*, LNEC, Lisboa, Portugal, (2016).
- [19] E. Cordeiro, A. Leça Coelho, M. C. S. Nepomuceno, *Comparison between the human reactions in a simulacrum and in a real fire situation*, *Fire and Evacuation Modelling Technical Conference 2016 (FEMTC 2016)*, Torremolinos, Spain, (2016).
- [20] E. Kuligowski, R. Peacock, *A Review of Building Evacuation Models 1st Edition*, Technical Note 1471, National Institute of Standards and Technology, (2005)
- [21] E. Kuligowski. *Modeling Human Behavior during Building Fires*, NIST, (2008).
- [22] E. Kuligowski, R. Peacock, B. Hoskins, *A Review of Building Evacuation Models*, 2nd Edition, National Institute of Standards and Technology, (2010).
- [23] E. Kuligowski, *Human Behavior in Fire*, In *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, (2016) pp. 2070-2114

- [24] Gwynne, Human Behaviour In Fire@ Model Development And Application, (2015).
- [25] E. Carattin, V. Brannigan, Science or Science Fiction? The Use of Human Behavioral Models in Fire Safety Regulation, (2013).
- [26] R. Lovreglio, E. Ronchi, D. Nilsson, An Evacuation Decision Model based on perceived risk, social influence and behavioural uncertainty, Simulation Modelling Practice and Theory, 66 (2016) 226-242. doi:10.1016/j.simpat.2016.03.006
- [27] E. C. Cordeiro, Modelação do comportamento das pessoas em caso de incêndio, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, (2010).

ORCID

Elisabete da Cunha Cordeiro 0000-0002-9199-3209 (<https://orcid.org/0000-0002-9199-3209>)
António Leça Coelho 0000-0001-6608-2174 (<https://orcid.org/0000-0001-6608-2174>)
Miguel C. S. Nepomuceno 0000-0003-3865-490X (<https://orcid.org/0000-0003-3865-490X>)

Avaliação experimental de tensões geradas num sistema de colagem de cerâmica sob ação de gradientes térmicos

Evaluation of Stresses in a Tile Fixing System Under Thermal Gradients

L. Silva^{a†}, P. Sequeira^a, A. Flores^b, N. Viriato^b, F. Q. Melo^b, M. A. Vaz^c

^a Saint-Gobain Portugal S.A., Zona Industrial Taboeira, 3800-055, Aveiro, Portugal

^b INEGI, Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial, Rua Dr. Roberto Frias, 400, 4200-465 Porto, Portugal

^c FEUP, Faculdade de Engenharia Mecânica, Rua Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, Portugal

[†] Autor para correspondência: luis.silva@saint-gobain.com

RESUMO

O sucesso da aplicação de cerâmica em fachadas e pavimentos exteriores depende, entre vários fatores, de uma correta relação e compatibilidade mecânica, química e física entre os todos os elementos envolvidos, a saber, o suporte, a cerâmica e as argamassas. Quando exposto a variação térmica, fatores como a dimensão e cor dos cerâmicos, tipologia do suporte e dimensão de junta adotada, assumem especial relevância ao nível das tensões obtidas. Um estudo recentemente publicado avalia as tensões geradas em contexto de aplicação com suportes como: reboco, betão ou um isolante térmico, apresentando exaustivamente resultados de combinações de vários elementos do sistema. Tais elementos parecem adequar-se e comprovar as exigências em contexto real, sublinhando a importância de se caracterizar experimentalmente alguns casos, como método de validação dos resultados obtidos em simulação numérica. O presente trabalho aborda este desafio ao definir e executar uma metodologia experimental que permite obter as tensões em diferentes componentes, por ação de um gradiente térmico sobre um sistema cerâmico colado em condições próximas dos modelos teóricos. Admite-se que a comparação de resultados obtidos permitirá fazer uma reflexão ao grau de aplicabilidade da metodologia teórica desenvolvida e eventuais necessidades de afinação da mesma.

ABSTRACT

Tile fixing success in external environments as façade, terraces and balconies depends, among several factors, on a correct mechanical, chemical and physical compatibility among all system elements such as support, tile and used mortars. When exposed to a thermal gradient, factors as tile size and color, support type and joint width, will play a special relevance in the stress field intensity. Recently, one study evaluates the stresses resulted in a context of tiling on several supports as mineral render, concrete and external insulation based on EPS panels, presenting results according to different combinations and proving the common demands in real context application. Also, underlines the need to test few cases as experimental approach to validate numerical one. Present work goes towards such objective, proposing an experimental setup to evaluate stresses in a tile fixing system, according to different combinations close to the theoretical model, submitted to a thermal gradient. Finally, comparing results, is possible to identify potential needs to finetune the theoretical model.

Palavras-chave:

Colagem cerâmica,
Variação térmica,
Avaliação
experimental de
tensões.

Keywords:

Tile fixing, thermal
variation,
Experimental
evaluation of
tensions.

1. Introdução

A colagem de cerâmica é uma técnica ancestral e, talvez por isso, tendencialmente subestimada do ponto de vista de requisitos técnicos capazes de assegurar um desempenho durável. Porém, a verdade é que a utilização de cerâmica como elemento de revestimento só se apresenta como uma solução milenar porque se tem conseguido reinventar, sobretudo a nível estético. Com efeito, o sucesso de tal adaptação continua a garantir as vantagens inerentes à utilização de cerâmica, como: durabilidade, resistência ao choque, resistência química e ao fogo, sem perder o potencial de inovação estética. Por tudo isso, quaisquer que sejam as tendências de construção gerais em fachadas e pavimentos, é frequente a necessidade de garantir que estes sejam capazes de receber elementos cerâmicos como revestimento. Por exemplo, os desafios mais recentes, implicam a garantia de compatibilidade de aplicação de cerâmica em contextos com suportes mais flexíveis (menores módulos de elasticidade, como sistemas ETICS - External Thermal Insulation Composite System -, placas de madeira, gesso ou cimento perfilado) e ambientes mais exigentes ao nível de variações térmicas, como é o caso de pavimentos radiantes ou resultando de condições climáticas mais agressivas em ambientes exteriores como fachadas ou terraços. Também, a própria cerâmica no seu caminho de reinvenção, cria desafios adicionais à sua fixação como é o caso de elementos de dimensões substancialmente maiores (superiores a 1x1m), cores mais escuras ou espessuras substancialmente menores como é o caso da lâmina cerâmica [1-3].

Por outro lado, no que respeita às normas e guias de recomendação de fixação por colagem de cerâmica, facilmente se percebe que foram construídas com base em pressupostos que estão ultrapassados, tornando-se em entraves ao desenvolvimento de soluções inovadoras ou, no mínimo, desconsideradas por não justificarem os motivos pelos quais apresentam tais limitações (admite-se que a normalização existente tenha por base estudos técnicos ou experiência acumulada mas nem sempre é uma informação de fácil acesso). Ou então, resultam em documentos que, não obstante serem aplicáveis ao mesmo tipo de necessidade, apresentam perspetivas/abordagens completamente distintas dos requisitos a cumprir. Por exemplo, a comparação entre as colas reativas, classe R, da EN 12004-1, ANSI 118-3 ou ISO 13007-1 e o caso da ISO 14448 (Low modulus adhesives for exterior tile finishing) que é suposto apresentarem desempenhos superiores em aplicação mais difíceis como fachadas, porém apresentando requisitos técnicos diferentes ou até antagónicos [4-10].

Face ao exposto, uma resposta adequada deve contemplar uma análise do princípio de tudo, a saber, o nível de tensões realmente geradas num sistema de colagem. No passado, vários trabalhos foram publicados para diversos contextos, mas, como esperado, dificilmente representam a variedade de situações como diferentes tipologias de suporte, dimensões de cerâmicos, largura de juntas entre cerâmicos, entre outros. Com efeito, é quase impraticável o planeamento e execução de trabalhos experimentais que abordem todas as variáveis possíveis [11-13].

Foi com base nesta dificuldade que, recentemente, se procedeu a um estudo teórico, já publicado, que avalia, por simulação numérica, as tensões geradas em contexto de aplicação com suportes como: reboco, betão ou um isolante térmico (EPS 100), apresentando exaustivamente resultados de combinações de vários elementos do sistema que parecem adequar-se e comprovar a necessidade de experiências em contexto real. O estudo apresenta a distribuição de tensões geradas por expansão térmica num sistema de colagem de elementos cerâmicos. A quantificação do campo de tais tensões foi efetuada por recurso a modelação por elementos finitos em que a distribuição de tensões de origem térmica se efetua de modo incremental, assumindo um gradiente de temperaturas entre a face exposta e a massa interna do material base, ligação cerâmico/argamassa-cola. O modelo numérico permitiu analisar as tensões de acordo com o critério de von Mises, o que se enquadra no comportamento de cerâmicos na construção. A aplicação do modelo foi realizada considerando duas juntas entre cerâmico de 1 e 6mm e várias dimensões de cerâmico (20x20cm; 30x30cm; 40x40cm; 60x60cm; 90x90cm; 120x120cm; 30x60cm; 30x90cm; 30x120cm). Para as combinações indicadas, fez-se a determinação das tensões normais à superfície (resultado de uma diferença de temperatura entre a superfície do cerâmico e a zona de contacto com a argamassa-cola), das tensões de corte (devidas à dilatação superficial entre o cerâmico e o material de colagem e de base e que podem apresentar gradientes

elevados nos contornos de fronteira) e das tensões de von Mises (obtido a partir da resultante das anteriores e, portanto, alvo específico do estudo). O valor das tensões foi obtido para a superfície do elemento cerâmico, para a interface entre o cerâmico e a argamassa-cola e para a própria argamassa-cola, sendo esta última a única considerada para o trabalho em questão. Finalmente, as tensões foram ainda determinadas relativamente à zona de extremidade do cerâmico e na zona central. Os resultados obtidos apresentam variáveis como a distância entre cerâmicos e a dimensão dos mesmos que condicionam fortemente as tensões resultantes ao nível da argamassa-cola, inclusive com valores acima da própria aderência que as mesmas podem proporcionar. Por isso, é admissível considerar limitações de colagem de elementos cerâmicos em situações de aplicação em exterior, como fachadas e pavimentos, em função da sua dimensão e da relação com a junta de preenchimento. Com efeito, os resultados de simulação numérica apontam para dimensões máximas de 60x60cm coladas com argamassas com aderências entre 1 e 2 N/mm². Finalmente, a publicação também sublinha a importância de caracterizar experimentalmente as tensões, pelo menos para alguns dos casos mencionados, como método de validação dos resultados obtidos na simulação numérica. Aborda também a problemática das tensões ao nível da camada de base no caso de suporte de ETICS, assumindo o seu módulo de Young para os cálculos, com resultados muito superiores à coesão interna do EPS o que leva a questionar se a consideração do módulo não deverá ser antes controlada pelo próprio EPS ou pela conjugação entre ambas [14,15].

Considerando os resultados obtidos por simulação numérica como uma ferramenta de excelência para apreciação de possibilidades de execução de obra, é naturalmente imperativo aferir e validar os resultados obtidos. A metodologia que se considera adequada para o efeito é baseada em ensaios experimentais especificamente equivalentes aos pressupostos do estudo numérico realizado. Esse é o motivo pelo qual se decidiu proceder ao estudo indicado no presente trabalho e apresentado durante o Congresso de Construção 2022, que apresenta um sumário da metodologia experimental realizada para o efeito e os principais resultados obtidos para duas situações à escala semi-laboratorial, um caso com utilização de suporte de reboco e um caso com utilização de um suporte de isolamento térmico pelo exterior (ETICS) com base em polistireno EPS 100 como material isolante. No final, apresentam-se as tensões resultantes em comparação com os valores obtidos a partir do modelo numérico e faz-se uma análise crítica aos resultados obtidos [16].

2. Materiais e métodos

A metodologia experimental adotada consistiu na construção de painéis com áreas aproximadas de 2x2m² que apresentam um conjunto de materiais aplicados segundo os esquemas de condições reais relativamente a fachadas expostas a condições ambientais diversas. Na realização dos testes experimentais, a escolha de materiais, dimensão de cerâmicos, distância entre cerâmicos, variação térmica de 30°C e locais de avaliação de temperaturas, deformações e tensões, tiveram em consideração a maior proximidade possível aos pressupostos do modelo teórico previamente trabalhado [14,15].

Considerando o objetivo de avaliação de uma parede com suporte de reboco e outra com ETICS, construíram-se 2 amostras distintas:

Amostra 1, relativa à situação de suporte em reboco:

- Alvenaria de bloco BT25 (espessura 25cm) revestida por argamassa de reboco com 1,5cm de espessura (classe CSIII);
- Revestimento:
 - a) Cerâmico do tipo BIa, cor escura ($\alpha > 0,7$), dimensão 60x60cm colado com argamassa-cola, classe C2S, por técnica de colagem dupla (penteado 8x8);
 - b) Junta entre cerâmicos de 6mm, preenchida por argamassa CG2W (cor cinza).

Amostra 2, relativa à situação de suporte em ETICS

- Alvenaria de bloco BT25 (espessura 25cm) revestida por argamassa de reboco com 1,5cm de

espessura (classe CSIII), seguida de aplicação de sistema ETICS composto por placas EPS100_6cm, coladas ao reboco com argamassa de colagem com aderência sobre betão de 1MPa, colagem contínua (penteado 8x8), argamassa de camada de base do tipo CSII + rede fibra de vidro, 160g/m², abertura 4x4mm, numa espessura pelo menos de 5mm;

- Revestimento:

- a) Cerâmico do tipo BIa, cor escura ($\alpha > 0,7$), dimensão 60x60cm colado com argamassa-cola, classe C2S, por técnica de colagem dupla (penteado 8x8);
- b) Junta entre cerâmicos de 6mm, preenchida por argamassa CG2W (cor cinza).

A medição de temperaturas foi realizada nos seguintes locais (Figura 1):

- na superfície externa do cerâmico, na zona central, em ambas as amostras (zona A);
- na superfície interna do cerâmico, entre esta e a argamassa-cola (zona B), em ambas as amostras;
- na superfície do reboco, entre esta e a argamassa-cola (zona C), no caso da amostra 1; e na superfície da camada de base reforçada, entre esta e a argamassa-cola, no caso da amostra 2.

Para as tensões, foram avaliadas nos seguintes locais (Figura 1):

- na superfície interna do cerâmico, entre esta e a argamassa-cola (zona B), em ambas as amostras;
- na superfície do reboco, entre esta e argamassa-cola (zona C), no caso da amostra 1; e na superfície da camada de base reforçada, entre esta e a argamassa-cola, no caso da amostra 2.

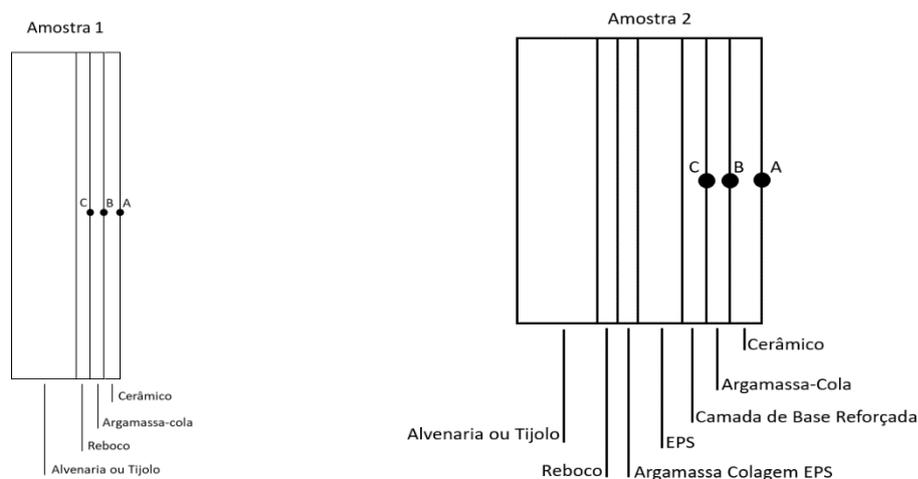


Figura 1 – Seção lateral da amostra 1 e amostra 2, com zonas de colocação de termopares (A, B e C) e extensómetros (B e C).

Assumindo o painel de dimensões 2x2m, preenchido com cerâmicos de 60x60cm e juntas de 6mm, as zonas instrumentadas (central e extremidade) são dispostas nas amostras segundo as indicações das Figuras 2 e 3.

Para cada amostra foram utilizados no total 8 rosetas de extensómetros (modelo 1-RY81-3/120 da empresa HBM) e 7 sensores de temperatura (termopares do tipo K). Em cada área, A0 e A1, e de acordo com o apresentado na Figura 2, os cerâmicos foram instrumentados na sua superfície interna com 2 rosetas de extensómetros e 2 termopares e na superfície externa com 2 termopares ambos assinalados a vermelho. . Adicionalmente, colocou-se um termopar extra na face externa do cerâmico da área A0, por forma a controlar a temperatura no interior da estufa. Para melhor compreensão da localização dos sensores em cada cerâmico (Figura 3), a roseta de extensómetros e o termopar colocados no centro dos cerâmicos (C), são referentes à Zona Central (ZC); enquanto a roseta de extensómetros colocada na extremidade do cerâmico, ou seja, num dos cantos, refere-se à Zona Extremidade (ZE). As áreas e as designações também se aplicam ao

reboco, para a amostra 1 e para a camada de base reforçada, no caso da amostra 2.



Figura 2 – Disposição das áreas instrumentadas nas amostras 1 e 2.

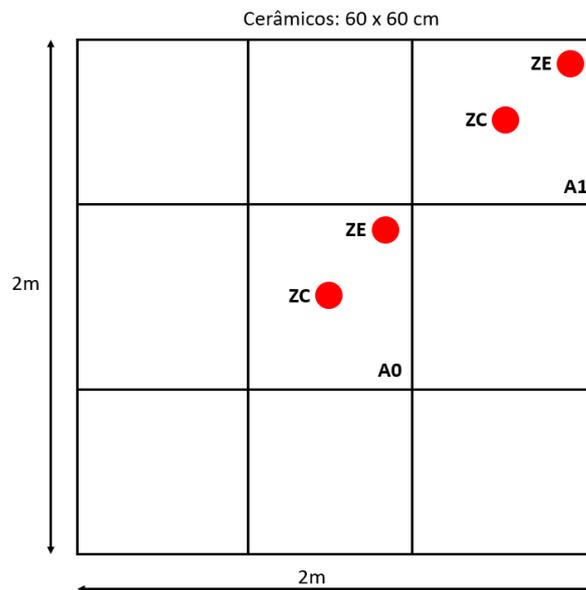


Figura 3 – Áreas e referências para a localização dos sensores: ZC – zona central; ZE – zona extremidade.

Para a aquisição dos sinais foram utilizados os respectivos módulos para extensometria (NI 9235) e temperatura (NI 9213) e o chassis cDAQ NI 9188, da empresa National Instruments. Para o registo dos sinais foi utilizado o programa Labview Signal Express também da empresa National Instruments. Todas as medições foram realizadas a uma frequência de amostragem de 5Hz. Após 48h em condições a temperatura ambiente, os painéis são sujeitos a 5 ciclos térmicos de 24h, com incremento da temperatura durante 1h até aos 50°C, permanecendo a essa temperatura durante as 7h seguintes. Após o total de 8h, a temperatura desce durante 2h até aos 20°C e permanece durante as 14h seguintes à temperatura de 20°C, terminando o ciclo. Apenas a face respetiva ao painel cerâmico é exposta às temperaturas indicadas de forma a promover o gradiente térmico ao longo de toda a seção da amostra. A Figura 4 apresenta a representação esquemática de cada ciclo.

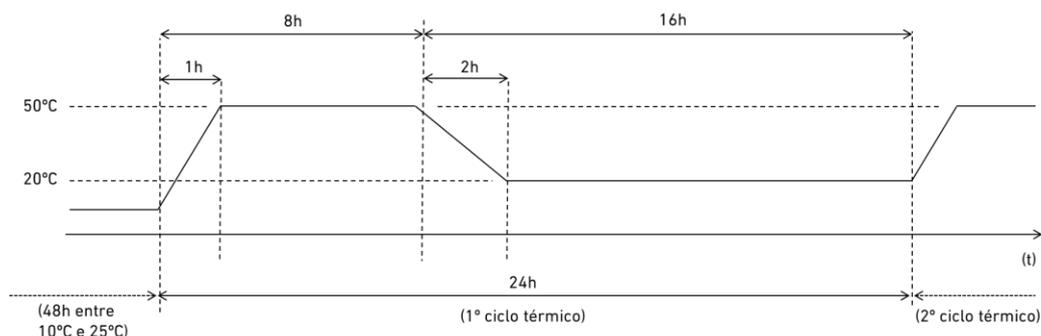


Figura 4 – Representação esquemática dos ciclos térmicos realizados.

No que respeita à realização do aquecimento, foi construída uma estufa que permite o aquecimento de todos os cerâmicos em simultâneo e que possibilita o arrefecimento posterior. A Figura 5 apresenta os sistemas de aquecimento e arrefecimento utilizados durante a realização dos ciclos. Salienta-se que o aquecimento foi controlado através de um controlador PID com um termopar colocado na face externa do cerâmico central. O arrefecimento, para a temperatura ambiente no ciclo térmico, foi conseguido através de ventiladores ajustados para atingir 20°C no intervalo de tempo de 2h.



Figura 5 – Sistemas de aquecimento (esquerda) e arrefecimento (centro e direita) utilizados para as duas amostras.

3. Resultados e Discussão

Para o cálculo das tensões, foi necessário conhecer as propriedades mecânicas de cada um dos componentes. Por conseguinte, para ambas as amostras foram consideradas as propriedades mecânicas que se apresentam na Tabela 1 e os pressupostos utilizados no estudo teórico [14,15].

Tabela 1 - Propriedades mecânicas dos materiais [14,15]

Material	Módulo de Young [GPa]	Coefficiente de Poisson	Espessura média aplicada [mm]
Cerâmico - C	32	0,2	10
Reboco- R	8	0,2	15
Argamassa-Cola - Adesivo	8	0,2	6
Camada de Base Reforçada - CBR*	8	0,2	6

*valor sem reforço da malha de fibra de vidro (160g/m², abertura 4x4mm e tratamento antialcalino)

As Figuras 6 a 15 apresentam os resultados das temperaturas, deformações e tensões para a parede normal (com reboco) e parede de sistema ETICS (com EPS100 de 6cm), para os vários ciclos realizados, evidenciando as tendências em fases de aquecimento e arrefecimento. A determinação das tensões obtidas na argamassa-cola, foi realizada a partir das deformações

medidas experimentalmente nos cerâmicos (superfície interna), assumindo que são equivalentes e aplicando o módulo de Young e coeficiente de Poisson respectivos à argamassa-cola indicado na Tabela 1. De notar que, para a situação relativa às tensões na zona da camada de base reforçada (CBR), admitindo que o modelo teórico assume discutivelmente o módulo da camada de base isolada, a partir de um ensaio de flexão a 3 pontos, determinou-se experimentalmente o módulo de Young do conjunto EPS 100 (60mm) com camada de base reforçada numa espessura de 6mm, cujo resultado foi de 25MPa (contra os 8GPa da argamassa), próximo do valor do próprio EPS 100 (50MPa), pelo que se decidiu assumir este valor referenciado para o cálculo das tensões (50 MPa).

Para cada ensaio, foi sempre realizado o ajuste de zero a todas as rosetas de extensómetros. Posteriormente, os sinais das tensões foram filtrados utilizando-se um filtro passa baixo Butterworth de 3ª ordem, com uma frequência de corte de 0,001Hz. Os valores de tensão são apresentados em MPa e as temperaturas em °C.

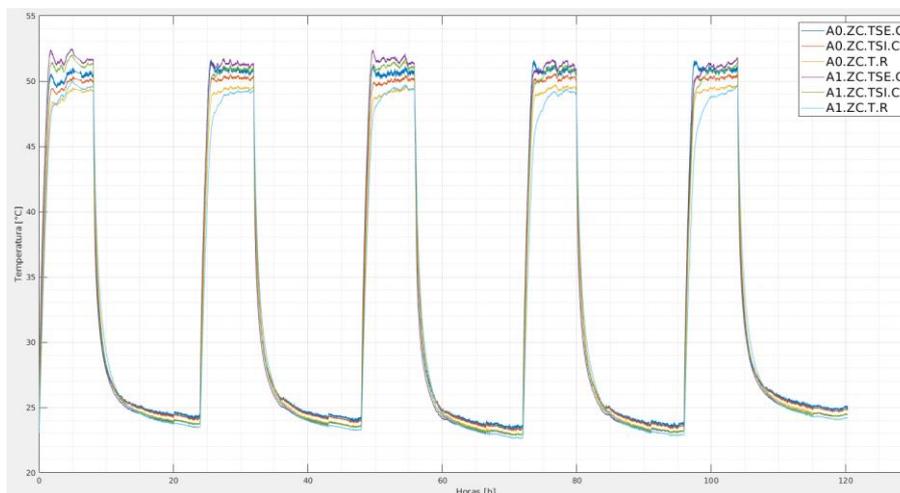


Figura 6 - Evolução das temperaturas no cerâmico (C), reboco (R) e argamassa-cola (AC), amostra 1, áreas A0 e A1, para 5 dias de ensaio.

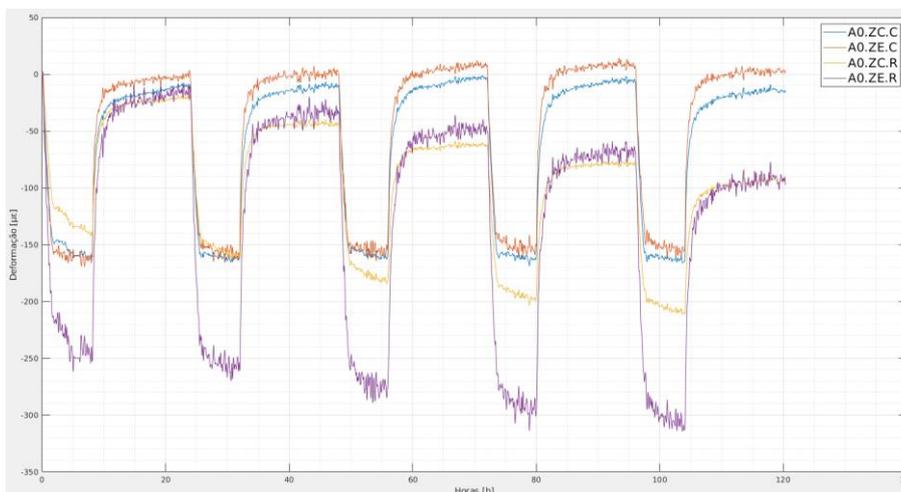


Figura 7 - Evolução das deformações no cerâmico (C) e reboco (R), amostra 1, área A0, para 5 dias de ensaio.

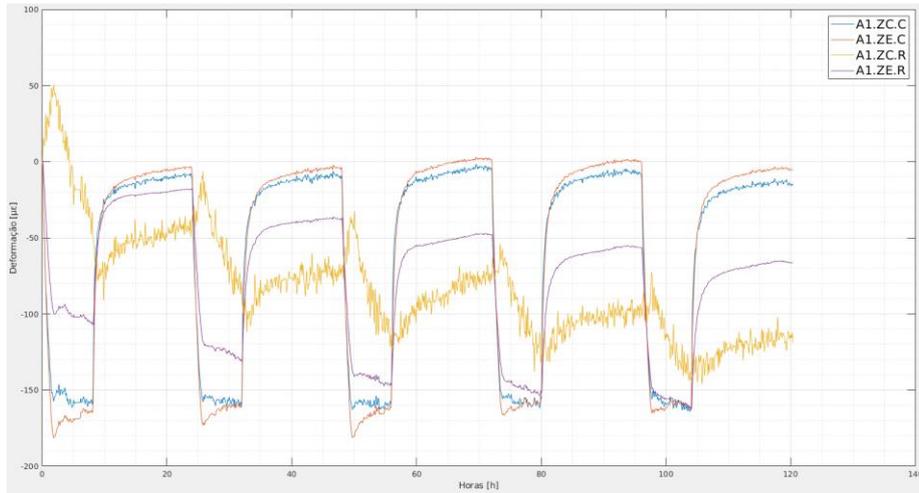


Figura 8 - Evolução das deformações no cerâmico (C) e reboco (R), amostra 1, área A1, para 5 dias de ensaio.

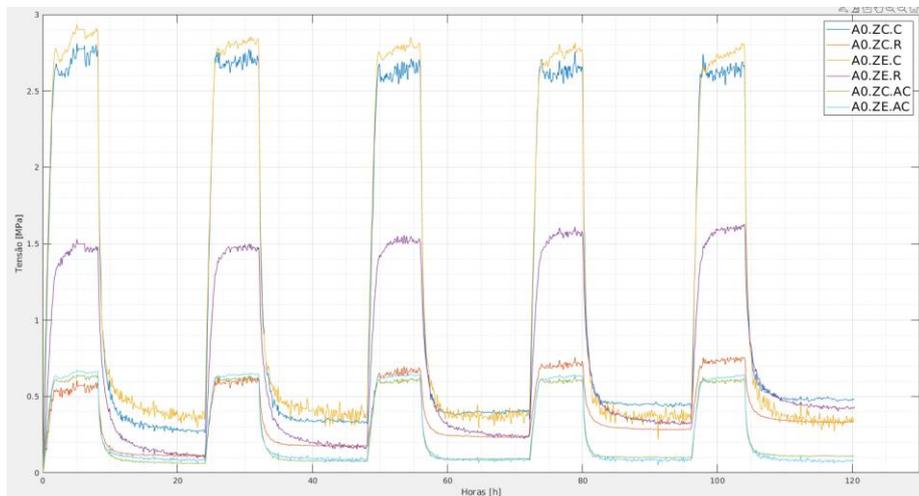


Figura 9 – Evolução das tensões equivalentes no cerâmico (C), reboco (R) e argamassa-cola (AC), amostra 1, área A0, para 5 dias de ensaio.

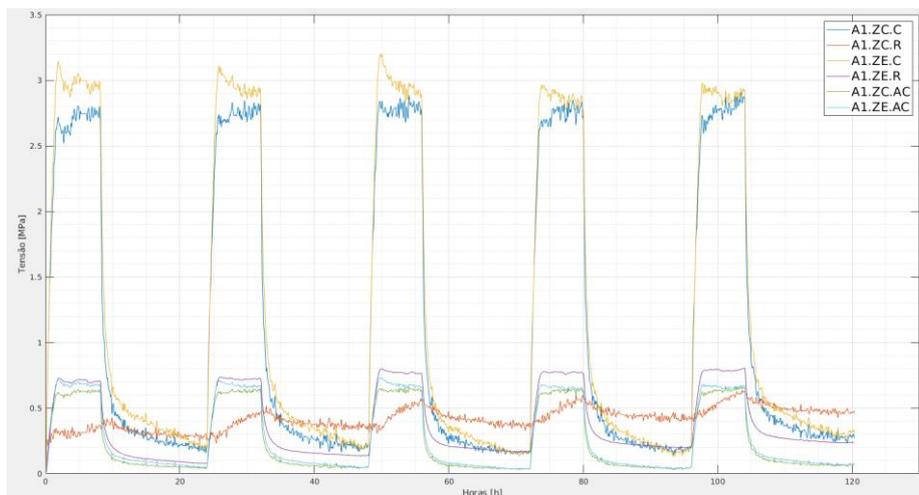


Figura 10 – Evolução das tensões equivalentes no cerâmico (C), reboco (R) e argamassa-cola (AC), amostra 1, área A1, para 5 dias de ensaio.

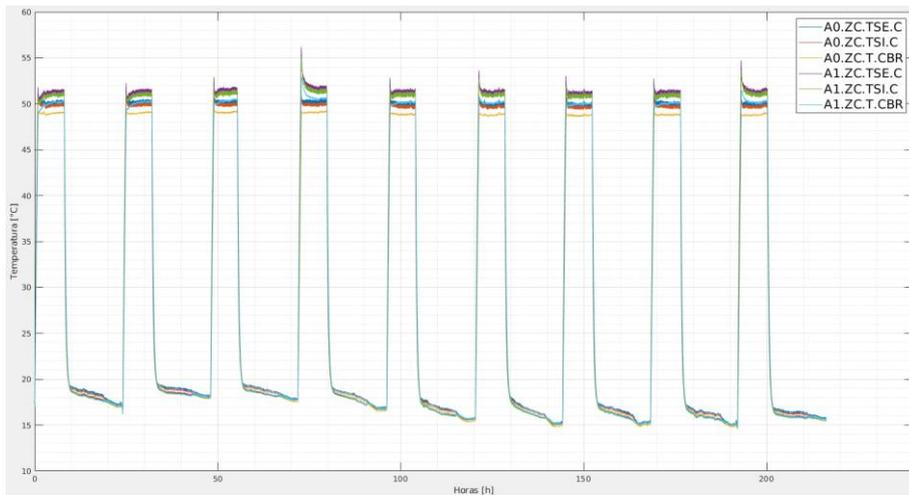


Figura 11 – Evolução da temperatura no cerâmico (C) e camada de base reforçada (CBR), amostra 2, áreas A0 e A1, para 10 dias de ensaio.

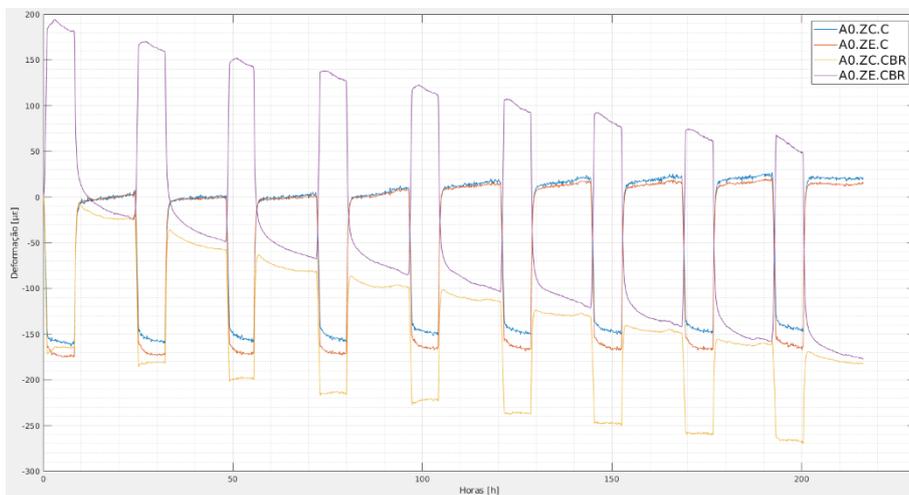


Figura 12 – Evolução das deformações no cerâmico (C) e camada de base reforçada (CBR), amostra 2, área A0, para 10 dias de ensaio.

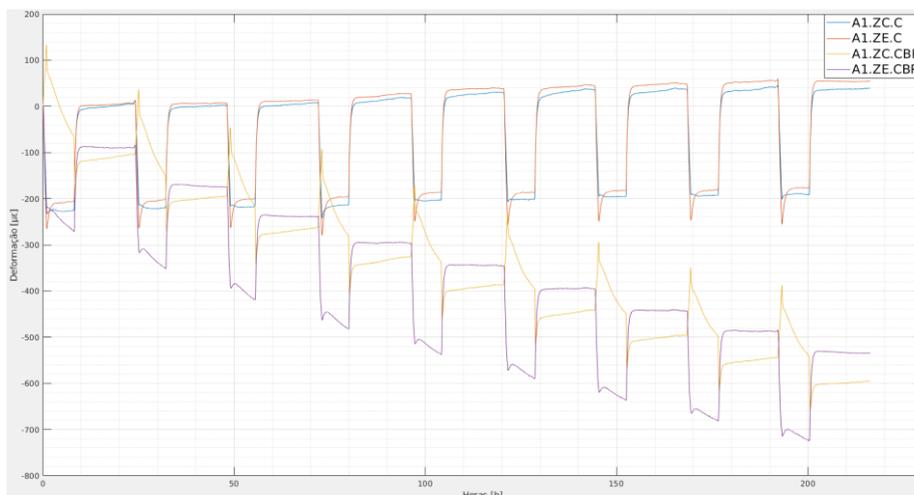


Figura 13 – Evolução das deformações no cerâmico (C) e camada de base reforçada (CBR), amostra 2, área A1, para 10 dias de ensaio.

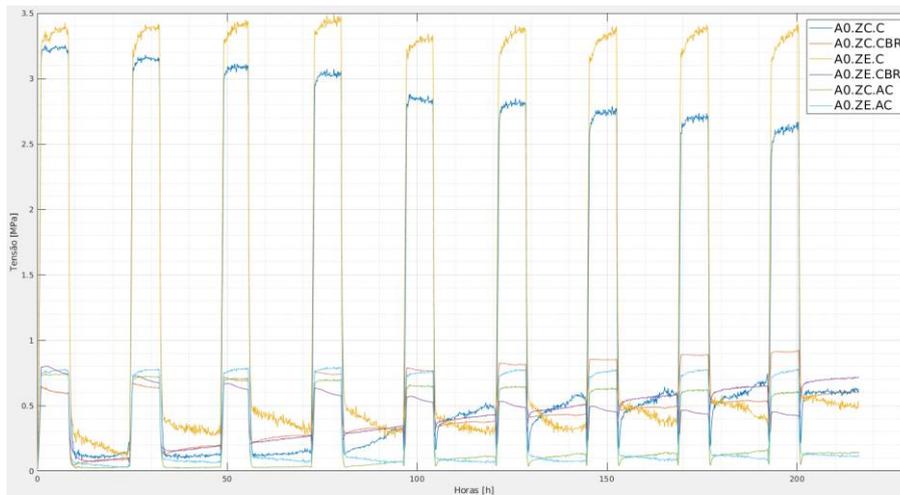


Figura 14 – Evolução das tensões equivalentes no cerâmico (C), camada de base reforçada (CBR) e argamassa-cola (AC), amostra 2, área A0, para 10 dias de ensaio.

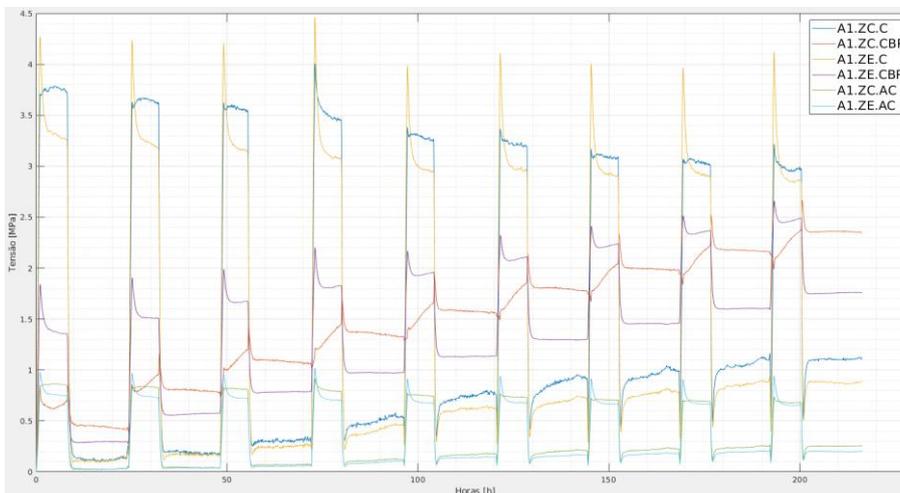


Figura 15 – Evolução das tensões equivalentes no cerâmico (C), camada de base reforçada (CBR) e argamassa-cola (AC), amostra 2, área A1, para 10 dias de ensaio.

A **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**, relativa à amostra 1, apresenta a comparação das tensões determinadas a partir dos modelos teórico e experimental, indicando, para a maioria dos casos, diferenças insignificantes, inferiores a 10%. Estes resultados sugerem que os pressupostos do modelo teórico são bastante aceitáveis e capazes de refletir com precisão o comportamento do sistema ao nível dos diferentes componentes. Ainda assim, verificou-se um caso para o reboco (zona central do cerâmico) com diferenças de 50% que merece uma análise com mais detalhe de interpretação.

Tabela 2 - Resultados relativos às tensões obtidas a partir da simulação numérica e da metodologia experimental aplicada, para a amostra 1 (referente ao caso de suporte com reboco).

Metodologia/Zona avaliação/elemento	Zona extremidade do cerâmico		Zona central do cerâmico	
	Adesivo	Reboco	Adesivo	Reboco
Simulação Numérica [14,15]	0,63	1,31	0,61	1,31
Medição experimental	0,66	1,52	0,66	0,65

No caso particular da amostra 2 (suporte em EPS 100), os resultados relativos às

deformações (e, conseqüentemente, das tensões) indicam tendências crescentes ou decrescentes, conforme a zona de análise, ao contrário dos resultados da amostra 1 (suporte de reboco) cujos resultados apresentam estabilidade logo a partir dos primeiros ciclos. Uma vez verificada a situação para a amostra 2, foi realizado novo ensaio com duração total de 30 ciclos, ou seja, 30 dias. Da análise dos resultados, e para o caso EPS, verifica-se uma tendência para estabilização apenas a partir do 25º ciclo, conforme refletido na Figura 16 e Figura 17, que apresentam essas tendências de forma mais visível, por apresentarem o valor específico de tensões obtido para cada ciclo, relativamente à argamassa de camada de base e argamassa-cola.

Este comportamento torna a interpretação dos resultados mais complexa, uma vez que levanta questões sobre que valor assumir como melhor indicador do sistema. Por isso, a Tabela 3 apresenta alguns casos com 2 valores experimentais, o primeiro relativo à média dos 30 ciclos e, o segundo, relativo ao valor máximo medido e que corresponde ao valor da fase de estabilização. No final, os 2 valores não são muito diferentes, mas a comparação com os valores das tensões durante os primeiros ciclos, revela diferenças significativas, em casos como a CBR, em mais de 100% (Figura 16).

Finalmente, também é relevante notar que os valores das tensões obtidos para a argamassa de camada de base são significativamente menores que a resistência interna do EPS (superior a 0,15MPa [17]), desde que se assuma o módulo de Young do conjunto EPS 100/Rede de reforço/camada de base, o que pode ajudar a explicar porque não se observam roturas em contexto real e confirmar que é acertado assumir o módulo de Young relativo ao EPS 100 e não à camada de base. Já ao nível das tensões na argamassa-cola, notam-se valores similares ao caso da amostra 1 ou até superiores.

Ainda relativamente à amostra 2, equivalente ao suporte em EPS 100, a comparação de resultados entre a simulação teórica e a determinação experimental revela que os valores experimentais são tendencialmente superiores para o caso da argamassa-cola e na ordem de 0,3MPa. Esta diferença é próxima de 50% face ao valor da simulação, que se poderá considerar aceitável uma vez que se enquadram dentro de um intervalo que classifica uma argamassa-cola dentro de mesma classe de exigência. Ainda assim, é uma diferença considerável que deve merecer uma análise detalhada de interpretação sobre o seu significado, provavelmente ao nível dos pressupostos adotados na simulação numérica. Ao contrário, a comparação de valores obtidos para a argamassa de camada de base reforçada apresenta diferenças menores (entre 20 e 40%), ainda justificando alguma ponderação ao nível desses mesmos pressupostos. Ao nível da simulação teórica, não existem resultados adotando um módulo de Young menor, pelo que não se pode fazer uma comparação nestas condições, ainda que se admita que não será muito díspar em relação às conclusões anteriores.

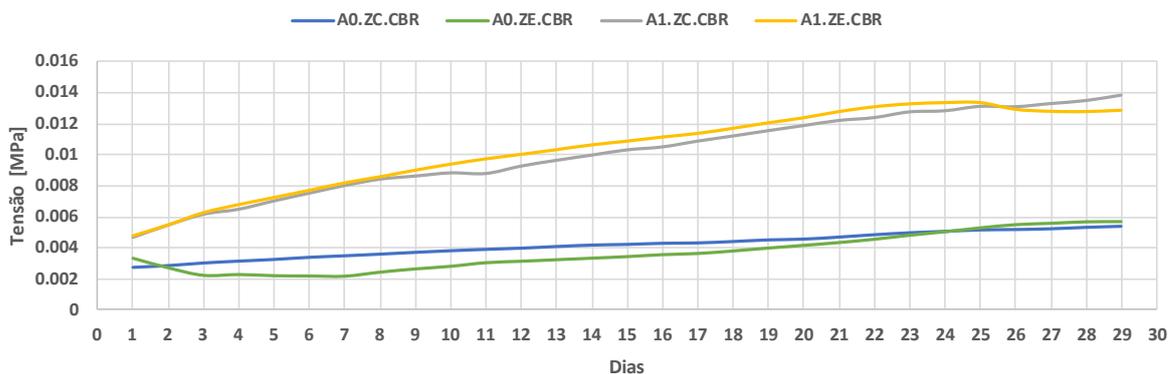


Figura 16 – Evolução das tensões equivalentes na camada de base reforçada (CBR), durante o aquecimento de 30 ciclos, para as áreas A0 e A1.

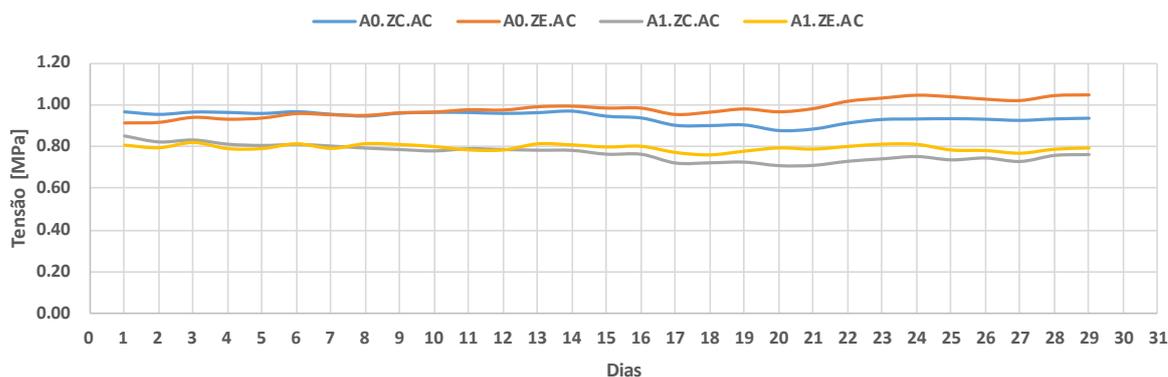


Figura 17 – Evolução das tensões equivalentes na argamassa-cola (AC), durante o aquecimento de 30 ciclos, para as áreas A0 e A1.

Tabela 3 - Resultados relativos às tensões obtidas a partir da simulação numérica e da metodologia experimental aplicada, para a amostra 2 (referente ao caso de suporte com sistema ETICS).

Metodologia/Zona avaliação/elemento	Zona extremidade do cerâmico			Zona central do cerâmico		
	Adesivo	CBR ⁽¹⁾	CBR ⁽²⁾	Adesivo	CBR ⁽¹⁾	CBR ⁽²⁾
Simulação Numérica [14,15]	0,61	0,61	n.t	0,61	0,61	n.t
Medição experimental ⁽³⁾	0,98; 1,05	0,43	0,004; 0,01	0,94; 0,97	0,72	0,004; 0,01

⁽¹⁾ Módulo de elasticidade (assumido) da camada de base: 8GPa; ⁽²⁾ Módulo de elasticidade (assumido) de uma combinação de EPS 100 e camada de base: 50MPa; ⁽³⁾ Para os casos onde aparecem 2 valores, o 1º valor corresponde ao valor médio medido e o 2º ao valor máximo

5. Conclusões

Este trabalho tem como objetivo principal a determinação experimental de tensões obtidas num sistema de cerâmica colada em suportes de reboco e EPS 100, a partir de uma metodologia experimental que permita obter as deformações exercidas, em diferentes componentes, por ação de um gradiente térmico. Posteriormente, pretende-se que as medições realizadas possam servir de validação ou contribuir para melhorias de um procedimento numérico, teórico, trabalhado anteriormente pelos autores, mas que carece, efetivamente, de prova experimental.

Os resultados obtidos a partir dos ensaios experimentais indicam valores de tensões equivalentes aos valores teóricos propostos, sobretudo quando o suporte considerado é reboco aplicado sobre uma alvenaria de bloco de betão leve, sugerindo que a elevada rigidez de todo o sistema contribui para uma estabilidade de todos os componentes ao longo de todos os ciclos aplicados e, por isso, os pressupostos adotados no modelo numérico, acabam por se adaptar sem surpresa.

Por outro lado, os resultados também demonstram que para o contexto de aplicação sobre um suporte em EPS 100 (sistema ETICS) existem discrepâncias significativas entre os valores teóricos e experimentais, sendo os últimos tendencialmente superiores em mais de 50%. Na verdade, o comportamento das deformações ao longo dos ciclos não teve a estabilidade que o sistema anterior apresentou. Antes, observou-se uma tendência a um incremento das deformações e tensões durante o aquecimento ao longo do tempo de ensaio, até se atingir uma estabilização após 25 ciclos. Em alguma dessa trajetória, é possível observar valores de tensões similares aos propostos pelo modelo teórico, sugerindo que o mesmo carece de fator de estabilização, provavelmente associado a materiais mais compressíveis como o próprio EPS 100.

Referências

- [1] Ceramic tile on the forefront of architecture, a 10 Year Retrospective Words: Richard P. Goldberg AIA, CSI, NCARB, Achitect-Professional Consultant International, LLC (PROCON).
- [2] G. Toplicic-Curcic, D. Grdic, N. Ristic, Z. Grdic, Ceramic façade claddings as an element of sustainable development, *Architecture and Civil Engineering*, 13, 3 (2015) 219-231.
- [3] S. Malanho, R. Veiga, Performance of external thermal insulating composite system (ETICS) with finishing ceramic tiles, In: 12th DBMC, Porto, 2011, IV, 1959-1966.
- [4] Revêtements de murs extérieurs en carreaux céramiques ou analogues collés au moyen de mortiers-colles en travaux neufs, *Cahiers des Prescriptions Techniques d'exécution*, CSTB, 2006.
- [5] Revêtements de sols intérieurs et extérieurs en carreaux céramiques ou analogues collés au moyen de mortiers-colles dans les locaux P3 au plus en travaux neufs, *Cahiers des Prescriptions Techniques d'exécution*, CSTB, 2006.
- [6] UNI 11493-1:2016 Piastrellature ceramica a pavimento e a parete - Parte 1: Istruzioni per la progettazione, l'installazione e la manutenzione, 2016.
- [7] EN 12004-1:2017- Adhesives for ceramic tiles - Part 1: Requirements, assessment and verification of constancy of performance, classification and marking, 2017.
- [8] International Standard ISO 13007-1, Ceramic tiles-Grouts and adhesives- part 1: Terms, definitions and specifications for adhesives, 2010.
- [9] American National Standard Specifications for The Installation of Ceramic Tile (ANSI), Material & Installation Standards, TCNA- Tile Council of North America, Inc., 2013.
- [10] International Standard ISO 14448, Low modulus adhesives for exterior tile finishing, 1st edition, 2016.
- [11] M.Y.L Chew. Factors affecting ceramic tile adhesion for external cladding. *Construction and Building Materials* 13(5) (1999) 293-296.
- [12] J. K. Flexiberger, Stresses in the composite system: tile, fixing mortar, base, in *General Conferences*, Vol. II, pág. P.BB-191, Qualicer, Castellon (Spain), 2006.
- [13] M. Abreu, M., Descolamento e fendilhação em revestimentos cerâmicos, 3º Encore, LNEC, Lisboa, 1801-1090, 2003.
- [14] L. Silva, P. Sequeira, F. Melo, C. Lopes, Evaluation of the von mises stress as a function of elastic modulus of the tile adhesive and joint grout mortars, 12th European Adhesion Conference and 4th Luso-Brazilian Conference on Adhesion and Adhesives, IST-University of Lisbon, September 2018.
- [15] L. Silva, P. Sequeira, F. Melo, C. Lopes, The Evaluation of Von Mises Stress Field in Bonded Tiling Ceramics as Function of the Elastic Modulus of the Tile-Adhesive and Joint Grout Mortars, *Proc IMechE Part L: J Materials: Design and Applications* 0(0) (2020) 1–8.
- [16] L. Silva, P. Sequeira, A. Flores, N. Viriato, F. Melo, M. Vaz, Avaliação experimental de tensões geradas num sistema de colagem de cerâmica sob ação de gradientes térmicos, Congresso Construção 2022 dezembro, Guimarães, Portugal, 2022.
- [17] V. Pereira, P. Sequeira, N. Vieira, L. Silva, Fixação de elementos cerâmicos no sistema ETICS. Pormenores que fazem a diferença, 4º Congresso Português de Argamassas e ETICS, Coimbra, Portugal, março 2012.

ORCID

Luis Miguel Cardoso da Silva	0000-0002-0925-8572 https://orcid.org/0000-0002-0925-8572
Andreia Flores	0000-0003-3293-6519 https://orcid.org/0000-0003-3293-6519
Nuno Viriato	0000-0001-9957-9486 https://orcid.org/0000-0001-9957-9486
Francisco Queiros de Melo	0000-0002-3679-5795

Mário A. P. Vaz

(<https://orcid.org/0000-0002-3679-5795>)

0000-0002-6347-9608

(<https://orcid.org/0000-0002-6347-9608>)

Melhoria de desempenho do ETICS, com base em lã mineral, por homogeneização da superfície de interação entre componentes

Increased performance of mineral wool based ETICS by components interaction surface homogenization

D. Cardoso^a, I. Flores-Colen^b, M. F. C. Pereira^c, P. Ferreira^d, P. Sequeira^d, L. Silva^{d†}

^a DECivil, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, n° 1, 1049-001 Lisboa

^b CERIS, DECivil, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, n° 1, 1049-001 Lisboa

^c CERENA, DER, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, n° 1, 1049-001 Lisboa

^d Saint-Gobain Portugal S.A., Zona Industrial Taboeira, 3800-055, Aveiro, Portugal

[†] Autor para correspondência: luis.silva@saint-gobain.com

RESUMO

A solução de isolamento térmico pelo exterior (ETICS) é reconhecida no mercado como solução de excelência no revestimento de fachadas, por prover conforto térmico, otimização de consumo energético e pelo próprio desempenho mecânico e estético, com vantagens inerentes. Porém, apresenta algumas limitações, uma das quais relacionadas com a reação ao fogo que, em parte, é melhorada pela utilização de materiais isolantes de base mineral, como a lã de vidro. Face a esta conjectura, admite-se um número crescente, mas ainda limitado na totalidade de ETICS, de casos com utilização deste material como isolante. Esta experiência crescente permite, por outro lado, conhecer fatores mais críticos na aplicação e sucesso deste sistema em específico, sendo um deles relacionado com casos de observação de falta de aderência em pontos aleatórios da fachada. Este estudo elabora e apresenta uma metodologia de trabalho que tenciona apresentar a causa para a anomalia e uma proposta de minimização ou eliminação da mesma, e que assenta na hipótese de otimização por homogeneização de absorção da superfície da placa isolante.

ABSTRACT

ETICS is widely recognized as a good solution to building façade due to thermal comfort, energy consumption optimization and as good mechanical and aesthetical performance. On the other hand, also presents few limitations, especially when related to fire reaction, unless the insulation material would be mineral wool. Based on this reality, is expected to see an increase of mineral wool as key material to support this system, which will bring specificities relate to it, namely the lack of adhesion of the mortars among several spots of the façade. This study presents a working methodology to clarify the main cause for such anomaly and a proposal to minimize or even eliminate it, based on the hypothesis of absorption homogenization of whole insulation board.

Palavras-chave:

ETICS; lã mineral; camada de base; otimização de interface; agente molhante.

Keywords:

ETICS; mineral wool; basecoat; interface optimization; wetting agent.

1. Introdução

A utilização de materiais isolantes, em sistemas de revestimento de fachadas e coberturas é uma técnica frequentemente utilizada na melhoria do desempenho energético dos edifícios, proporcionando a diminuição da necessidade de consumo de energia para aquecimento e arrefecimento dos espaços interiores. Frequentemente, são incorporados num contexto de um Sistema de Isolamento pelo Exterior (ETICS), muito comum na Europa, resultando num sistema também de desempenho elevado ao nível mecânico, com boa resistência à fissuração e estético. Um dos materiais que é frequentemente utilizado para este revestimento é a lã mineral que, para além de ser considerado um bom isolante, é um material que garante o isolamento sonoro, um bom comportamento ao fogo e ainda é um material cujo impacte ambiental é inferior ao de outros materiais, tais como o EPS e o XPS. A lã mineral, sob as formas de lã de rocha ou vidro, é um material classificado segundo a EN 13162, incombustível, que se apresenta numa estrutura de fibras entrecruzadas numa estrutura porosa e flexível. Como parte de um sistema ETICS, existe um conjunto de componentes, além do isolante, como uma argamassa de base mineral ou orgânica, usada para fixação e barramento dos materiais, neste caso, reforçada com rede de fibra de vidro com tratamento alcalino, outros materiais de suporte à fixação, como buchas para ancoragem mecânica e, finalmente, soluções de revestimento final, que podem incorporar um primário. Como solução de revestimento de fachadas, além da função de isolamento térmico, deverão garantir outras funcionalidades próprias deste elemento construtivo, como são a impermeabilização e a estética. Assim, a própria EAD 040083-00-0404 define requisitos mínimos de desempenho como sistema e como componentes isolados, cuja garantia de cumprimento deverá conduzir a períodos de vida útil mínimos de 25 anos [1-3].

Relativamente às argamassas de camada de base, são constituídas por uma mistura de um ligante (mineral, orgânico ou ambos), agregados específicos e aditivos/adjuvantes, como éteres de celulose (como suporte à reologia da argamassa, tempo aberto e de presa), outros reológicos como bentonites, fibras de celulose, estearatos/oleatos como agentes hidrofóbicos e fibras acrílicas para aumentar a sua flexibilidade, resistência à fissuração em fase plástica e fase endurecida durante ações de impacto. O seu desempenho, como material independente, é determinado pela EN 998-1 para o caso de argamassas de ligante mineral, que destaca propriedades como a resistência à compressão, condutibilidade térmica e absorção de água por capilaridade. Em contexto de sistemas de isolamento térmico de fachadas (ETICS), que se submetem à EAD 040083-00-0404, e que implica um conjunto de avaliações e requisitos mínimos entre a camada de base (que se impõe ser armada com uma rede de fibra de vidro) e o painel isolante. Por inerência à experiência adquirida nos ETICS, é razoável admitir a relevância da camada de base no comportamento global da solução, com particular destaque à resistência ao impacto e à fissuração e capacidade de impermeabilização do sistema. A maioria de desenvolvimento relativamente a estes materiais, implica o estudo da concentração e tipo de resinas poliméricas combinadas com o ligante mineral (cimento Portland e/ou cal) de forma a otimizar o desempenho nestas propriedades em particular. A sua relação com a rede de reforço (tipicamente, malha de fibra de vidro, 4x4mm, 160g/m²) é igualmente relevante, e esta opção em particular justifica-se pelo melhor compromisso entre a capacidade de aderência da argamassa ao material isolante e a garantia de uma resistência à tração/impacto aceitável [4,5].

Na verdade, a garantia de desempenho do sistema ETICS só é alcançada quando se garante uma compatibilidade química, física e mecânica entre todos os seus componentes. Um dos casos mais críticos que pode condicionar tal compatibilidade prende-se com a relação entre a camada de base e o isolante de lã mineral que, pela sua elevada repelência, tende a prejudicar a “molhabilidade” da argamassa à sua superfície, condicionando o resultado ao nível de aderência e compatibilidade de materiais. Também é relevante considerar que, raramente se consideram propriedades específicas dos materiais para a interpretação do seu desempenho, embora se admita em alguns estudos que a retração ou módulo de elasticidade da argamassa podem estar na origem de alguns problemas associados a fissuração (no caso do módulo de elasticidade, é o próprio EAD que identifica o valor de 8GPa como valor máximo recomendável para um resultado eficaz). Adicionalmente, a aplicação da camada de base sobre a superfície da lã de vidro, revela alguns problemas tais como a dificuldade no espalhamento da argamassa sobre a respetiva superfície e a

falta de aderência em zonas pontuais na interface dos dois materiais, que se demonstra não só pelos valores baixos da tensão de rotura, como também no aparecimento de certas anomalias, tais como empolamentos e descolamentos. Considerando a problemática específica de compatibilidade entre uma camada de base mineral e o isolante de lã como uma questão complexa, o trabalho em questão, já apresentado no Congresso de Construção 2022, foi orientado no estudo de interpretação de causas para o efeito e apresentação de soluções de melhoria de interface [1,6,7].

Admite-se que as causas principais para esta anomalia se relacionam, por um lado, com a elevada hidrofobicidade da superfície da lã mineral, que tende a repelir a argamassa, sobretudo durante a fase de aplicação do estado fresco e, por outro lado, pelo facto de se observar heterogeneidade elevada na superfície da lã, causando zonas de fácil ou difícil ligação da argamassa, consoante a existência ou ausência de alguma hidrofiliçidade, conduzindo a zonas mais ou menos ligadas. Tal processo, faz com que o material não tenha um comportamento constante ao longo da superfície de contacto com a argamassa de camada de base, resultando em anomalias associadas à fraca aderência entre os dois e em roturas com comportamentos bastante heterogêneos (figura 1), não sendo por isso possível definir um padrão de rotura neste isolante. A prática empírica de pré-humedecimento da superfície da lã mineral revela-se como uma variável estratégica na melhoria de compatibilidade com a argamassa de camada de base. Considera-se que a humedificação da superfície da lã, por melhorar a hidrofiliçidade geral resulta numa maior homogeneização na superfície do isolante, sem condicionar negativamente as ligações com a argamassa, também ela hidrofílica (no sentido contrário, a tentativa de hidrofugar por completo toda a superfície piorou a compatibilidade do estado fresco, pela maior repelência), no âmbito do projeto de investigação. Porém, é questionável se a utilização de água na interface dos dois materiais diminui a aderência da argamassa no estado endurecido; ou, se existirá algum limite de presença de água após o qual delimita tal interação e, finalmente, se é possível melhorar o processo de humedecimento que se revela difícil dada a elevada hidrofobicidade da lã mineral e que resulta em repelência forte durante a aplicação de água [8,9].

Neste sentido, a investigação continuou com o propósito de perceber esta interação entre a camada de lã de vidro, a água e a argamassa. Com isto, os trabalhos desenvolvidos ao longo deste projeto de investigação, tiveram como principal objetivo desenvolver uma técnica que permitisse melhorar o espalhamento da argamassa sobre a superfície da lã de vidro e a sua aderência no estado seco. A metodologia consiste na adição de agentes molhantes ou surfactantes, moléculas capazes de causar uma alteração física na superfície dos líquidos. Independentemente do tipo, todas as possibilidades existentes possuem um grupo hidrofílico, solúvel em água, ligado a uma cadeia longa hidrofóbica. A presença de grupos polares e não polares contribuem para a facilidade de mistura de água com partes não hidrofóbicas, reduzindo a sua tensão superficial e permitindo o seu espalhamento para superfícies apolares como será o caso de uma lã mineral [10].



Figura 1 - Arrancamento de filamentos da lã de vidro quando a argamassa é aplicada na superfície seca. As figuras a), b) e c) são resultados de alguns testes da aplicação com espátula.

2. Materiais e Métodos

A metodologia experimental adotada consistiu na aplicação de uma argamassa de camada de base, constituída por cimento, resina redispersável, agregados de sílica, agentes reológicos e hidrófugos, sobre placas de lã de vidro em diferentes condições de preparação prévia (figura 2):

- Aplicação direta, sem aplicação de qualquer humedecimento prévio.
- Aplicação da camada de base após aplicação prévia de uma solução aquosa com diferentes concentrações de agente molhante (0,01, 0,02, 0,05 e 0,1%).

As aplicações da solução aquosa foram realizadas com auxílio de um rolo de pintura, com 3 a 5 passagens por caso. Após um período entre 10 a 15 minutos, aplicou-se a argamassa de camada de base numa espessura entre 3 e 5mm e deixou-se em cura a 55% Hr e 22°C durante um período mínimo de 7 dias. Após este período procedeu-se ao ensaio de aderência por tração perpendicular, por corte de uma área de 10x10cm, aplicação de um cerâmico sobre a mesma, e a aplicação de um disco metálico para servir de suporte à ligação ao dinamómetro de 16 kN (figura 3).

Em paralelo, relativamente ao conjunto lã de vidro e às várias soluções aquosas de pré-humedecimento, fizeram-se ensaios de absorção de água por capilaridade como forma de avaliar a velocidade e a extensão de humedecimento da superfície do isolante. Por outro lado, este ensaio também serviu para avaliar o quanto uma extensão elevada de humedecimento se poderá apresentar como negativa, por corresponder a um excesso de água absorvida e consequente degradação da própria lã mineral. Finalmente, fizeram-se ensaios de absorção de água por capilaridade a partir do contato de uma amostra de lã mineral (30x30x6cm) com um filme de solução aquosa com diferentes percentagens de agente molhante.



Figura 2 - Preparação dos provetes de análise por aplicação da solução aquosa com e sem agente molhante, seguida de aplicação da argamassa de camada de base.

A lã mineral (de vidro) utilizada para os ensaios experimentais foi o webertherm clima 34, um painel rígido de alta densidade de lã de vidro, não hidrófilo, com uma condutibilidade térmica de 0,034W/(m.K), absorção de água a curto prazo menor que 1kg/m² (EN 1609) e uma resistência à compressão de 15kPa (EN 826) [11].

A argamassa de camada de base usada foi o webertherm pro, que corresponde a uma mistura de cimento Portland, areias de sílica, polímero redispersável e adjuvantes orgânicos como éter de celulose, estearatos e fibras sintéticas. Tem uma massa volúmica endurecida entre 1200 e 1300kg/m³, absorção de água classe W2 e aderência sobre lã mineral superior a 0,08N/mm² (rotura pelo isolante), testes realizados segundo os métodos ensaios descritos pela EN 998-1 ou pela EAD 040083-00-0404 [12].

O agente molhante usado para a realização dos testes é um éster polisfosfórico de aquiléter, emulsionável à água, com extrato seco de 98% [13].



Figura 3 - Preparação dos provetes de análise por aplicação da solução aquosa com e sem agente molhante, e tipologias de rotura dos ensaios de aderência.

3. Resultados e Discussão

As tabelas 1 e 2 apresentam os resultados obtidos relativamente ao volume de água absorvido, velocidade de absorção, altura de lâmina de água absorvida pela lã mineral e a percentagem mássica de água retida após os ensaios de capilaridade realizados. Os resultados são apresentados em função da percentagem de agente molhante adicionado e para vários tempos de absorção realizados. A tabela 3 apresenta os resultados de absorção, após 2 minutos, em função da percentagem de agente molhante presente na água, mas a partir de aplicação com rolo de pintura, por forma a aproximar-se de uma situação de aplicação real.

Tabela 1 - Resultados de absorção de água por capilaridade após 15 minutos (900s) para as soluções aquosas relativamente à lã de vidro, em função da concentração de agente molhante.

Agente molhante (%)	Volume absorvido (mL; %)	Velocidade absorção (mL/s)	Altura de lâmina de solução absorvida (mm)
0	0	0	0
0,02	60; 20	0,07	6
0,05	70; 23	0,08	9
0,07	110; 37	0,12	10
0,10	155; 52	0,17	11

No sentido de melhorar o processo de humedecimento, testou-se a adição de um agente molhante à água. Este ensaio permitiu concluir que a quantidade de agente molhante na mistura de humedecimento influencia de forma direta a velocidade de absorção da lã, o que significa que quanto maior for a quantidade de agente adicionado, maior será a velocidade de absorção, mesmo quando a aplicação é realizada por rolo de pintura (tabela 3). Nos valores obtidos para as tabelas 1 e 2, a velocidade varia desde 0,07 ml/s até 0,17 ml/s, mantendo-se a amostra sem agente molhante totalmente hidrofóbica, não registando por isso qualquer tipo de absorção. No entanto, apesar do agente molhante influenciar a velocidade de absorção, é ainda necessário avaliar se este limita a capacidade de absorção da lã de vidro, isto é, se a lã em contacto permanente consegue absorver toda a mistura ou se a quantidade de agente molhante limita a quantidade absorvida. E, na verdade, os resultados obtidos, não obstante apontarem para o humedecimento como um fator positivo para melhorar a compatibilidade com a camada de base, também evidenciam que, com tempo de exposição exagerado ou com excesso de agente molhante, o volume de água absorvido pode ser elevado e contribuir para degradação do isolante (figura 4).

Tabela 2 - Resultados de absorção de água por capilaridade após 24h para as soluções aquosas relativamente à lã de vidro, em função da concentração de agente molhante.

Agente molhante (%)	Volume absorvido (mL; %)	Altura de lâmina de solução absorvida (mm)
0	0	0
0,02	100	> 12
0,05	100	> 12
0,07	100	> 12
0,10	100	> 12

Tabela 3 - Medição da absorção da mistura com agente molhante após 2 minutos da aplicação com o rolo

Agente molhante (%)	Mi (g)	Mf (g)	% aumento massa
0	294	314	7
0,02	272	334	23
0,05	300	488	63
0,07	280	508	81
0,10	282	532	89

**Figura 4** - A mistura de água com 0,1% de agente molhante resulta em absorção de água rápida e níveis elevados, que resultará num material que perde hidrofobicidade e durabilidade.

Tendo em consideração as observações dos ensaios de absorção capilar, é perceptível que a quantidade de agente a ser utilizada não deverá exceder os 0,05%, pois a absorção excessiva poderá prejudicar o desempenho do material enquanto isolante. Neste sentido, foram realizados outros ensaios de absorção capilar, com medições mais frequentes para amostras de lã de vidro em contacto direto com misturas de 0,03% e 0,05% de agente molhante, estando os resultados expressos na figura 5. Para além disso, foi necessário avaliar se as propriedades de absorção do sistema (lã + camada de base) seriam alteradas devido à utilização do agente molhante no humedecimento da superfície de contacto entre as duas camadas. Assim, foram realizados os mesmos ensaios de absorção para amostras de lã + camada de base, estando os resultados expressos na figura 6.

A análise das curvas da figura 5, demonstram que a utilização do agente molhante proporciona uma alteração significativa das propriedades de absorção capilar da lã de vidro, verificando-se que a absorção no fim do ensaio é aproximadamente 20 vezes superior nas

amostras com agente em comparação com as amostras que estiveram em contacto com a mistura sem agente. Por outro lado, a utilização de maiores quantidades de agente molhante proporciona uma absorção mais rápida nos primeiros momentos, havendo posteriormente uma tendência para um ponto de saturação, relativamente próximo nos dois tipos de amostras. As curvas de absorção capilar, para as amostras de lã + camada de base (figura 6) demonstram em primeira instância que, no sistema, a utilização do agente molhante não proporciona diferenças tão significativas, o que indica que a utilização do agente molhante não afetará, à priori, a capacidade de absorção de um ETICS.

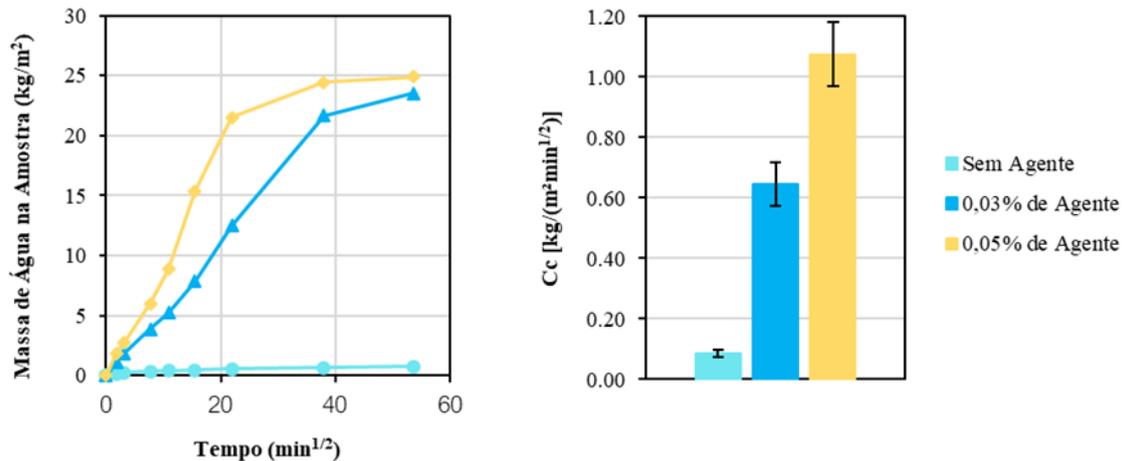


Figura 5 - Curvas de absorção capilar para as amostras de lã de vidro em contacto com as misturas com 0,03% e 0,05% de agente molhante

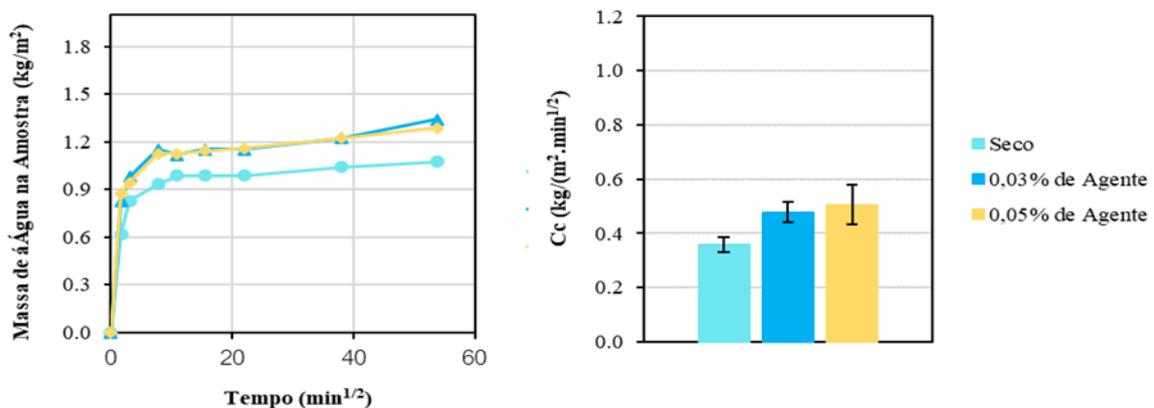


Figura 6 - Curvas de absorção capilar para as amostras do sistema (lã + camada de base)

A tabela 4 e figura 7 apresentam resultados respetivos aos ensaios de tração (*pull-off*) para as várias variáveis em estudo. Os resultados confirmam a tendência para o efeito positivo do humedecimento relativo da lã mineral a dois níveis: i) os valores de aderência tendem a ser superiores; e ii) a tipologia de rotura tende a ser mais profunda no próprio isolante, sugerindo maior compatibilidade química e física com a argamassa de camada de base. Adicionalmente, a utilização de agente molhante na solução usada para o humedecimento aponta para uma redução na variabilidade dos resultados, com menor desvio padrão, o que também é corroborado por maior constância da tipologia de rotura ao longo de toda a área de amostra em estudo.

Os resultados obtidos indicam que o agente molhante atua sobre a lã de vidro, alterando as suas propriedades hidrofóbicas e, quanto maior a sua percentagem, maior será a velocidade de absorção da própria lã. Por outro lado, a quantidade de agente molhante não limita a capacidade de absorção da lã uma vez que, independentemente da quantidade de agente molhante usada, a lã absorveu toda a mistura com a qual está em contacto, apenas em tempos diferentes, indicando que

que a percentagem do agente condiciona, sobretudo, a velocidade de absorção de água. Com efeito, com a utilização de maiores quantidades de agente molhante, obtém-se maior absorção de água pela lã em períodos menores.

Tabela 4 - Resultados de tração perpendicular (ensaio pull-off) para as diferentes combinações testadas ao nível do pré-humedecimento da lã mineral.

Agente molhante (%)	Aderência (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Tipologia de rotura
0	0,060	0,006	
0,03	0,070	0,003	Coesiva no isolante (mais profunda)
S/ humedecimento	0,056	0,005	Coesiva no isolante (superficial)

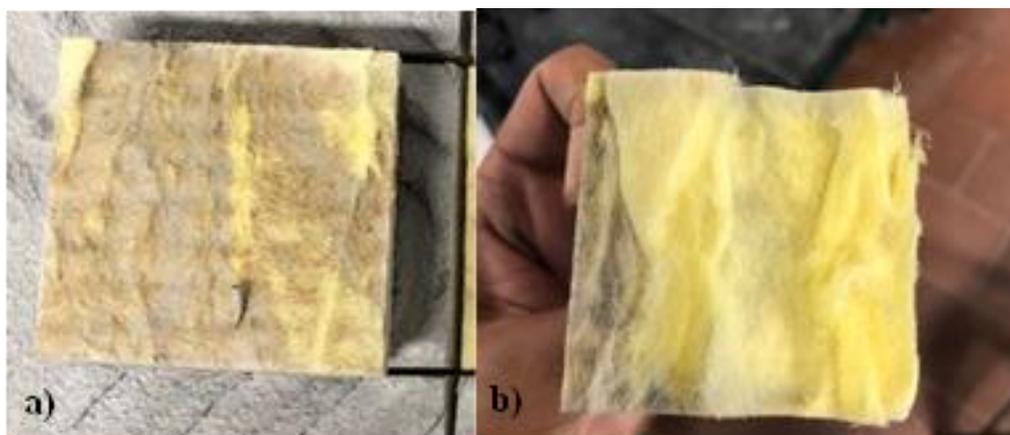


Figura 7 - Resultado do ensaio de tração na (a) superfície seca e na (b) superfície húmida com agente molhante, ao nível da tipologia de rotura obtida.

O agente molhante em causa, corresponde a um tensoativo, que atua diminuindo a tensão superficial da água que, em contacto com a superfície da lã, faz com que as gotas de água se desintegram e sejam absorvidas pelos poros de menores dimensões do isolante. Esta alteração das propriedades de absorção da lã mineral, proporciona a homogeneização da superfície de contacto entre as duas camadas, facilitando a ligação entre as mesmas. Para além disso, o processo de humedecimento proporciona uma diminuição do atrito entre o mecanismo de espalhamento da argamassa e a própria superfície, facilitando o respetivo mecanismo e impedindo que filamentos de lã sejam arrancados durante o mesmo processo. Também, os ensaios *pull-off* demonstraram que a utilização da técnica de humedecimento permite melhorar a aderência através de resultados com roturas mais coesivas, isto é, com maiores quantidades de lã arrancadas durante o processo de rotura, no entanto não foram registadas melhorias no que respeita ao valor da tensão de rotura. Contudo, para além da respetiva técnica permitir que a rotura seja mais coesiva, verifica-se que existe uma aproximação daquilo que se descreve como um padrão de rotura, havendo uma maior homogeneização no perfil de rotura das várias amostras. Finalmente, os resultados obtidos evidenciam o papel relevante de surfactantes ou agentes molhantes na melhoria de ligação entre as argamassas e uma superfície mais heterogénea como um painel de lã mineral. Este deverá ser um campo de pesquisa porque o universo de possibilidades destes agentes é enorme o que faz prever a possibilidade de otimização. Mais relevante é a consideração que a sua funcionalidade é diminuída se forem adicionados à argamassa o que constituiria uma melhoria significativa no processo de aplicação uma vez que reduz um passo na aplicação do sistema.

5. Conclusões

O estudo em questão elabora e apresenta uma metodologia de trabalho que tenciona apresentar a causa para anomalia específica de empoamento de camada de base sobre isolante de lã mineral e uma proposta de minimização ou eliminação da mesma, que assenta na hipótese de otimização por homogeneização de absorção da superfície da placa isolante. A partir dos trabalhos realizados no âmbito de um projeto de investigação, foi desenvolvida uma técnica de aplicação da camada de base sobre a lã, que permitiu dar uma resposta a estas questões. A técnica em causa, consiste na humidificação prévia da superfície da lã de vidro, com uma mistura de água com 0,03% de um agente molhante, aplicada com o auxílio de um rolo, e aplicação posterior da argamassa sobre a mesma superfície. Este procedimento resulta em valores de tração com maior homogeneidade ao longo de uma superfície de isolante e modos de rotura tendencialmente mais coesivos na própria lã.

Resumidamente, pode assumir-se que a técnica de humidificação com rolo melhora o espalhamento da argamassa sobre a superfície e permite resultados mais coesivos e homogêneos em comparação com a aplicação a seco. Adicionalmente, com a utilização do agente molhante garante-se que a superfície humedece de forma homogênea e facilita o próprio processo de humedecimento.

Por outro lado, a utilização deste tipo de agente levanta algumas questões sobre a alteração das propriedades isolantes da lã mineral, com impactos potenciais de colonização biológica ou perda de propriedades isolantes por incremento da condutibilidade térmica. Neste sentido, foram realizados ensaios de absorção capilar e de secagem, que permitiram verificar o impacto do mesmo agente na alteração das capacidades de absorção da lã e do sistema (lã e camada de base). Os resultados permitem concluir que a utilização do respetivo agente proporciona uma alteração significativa na capacidade de absorção da lã mineral, verificando-se que o incremento da sua quantidade resulta maior velocidade de absorção, embora com valores máximos absorvidos finais similares, apenas com diferença do tempo para o efeito, o que implica uma relação ótima a definir em função da relação com a dualidade tempo/quantidade de água adicionada.

A continuidade desta investigação deverá incidir em ensaios de validação a uma escala maior, de modo a que se possa fazer uma análise estatística mais detalhada, otimizar uma metodologia de análise da rotura e avaliar com maior foco os riscos potenciais de um excesso de humedecimento. Em paralelo, considerando a facilidade de processo, sugere-se o estudo de outros adjuvantes que possam resultar em desempenhos técnicos superiores do próprio isolante, sem condicionar as suas vantagens atuais.

Agradecimentos

Trabalho realizado no âmbito do projeto SRS - Smart Roofs System: Advanced Roofs Waterproofing System, POCI-01-0247-FEDER-046957, financiado por COMPETE 2020, Portugal 2020, FEDER. I.Flores-Colen e M. F. C. Pereira agradecem à FCT e às respectivas unidades de investigação CERIS [UIDB/04625/2020] e CERENA [UIDB/04028/2020].

Referências

- [1] B. PetterJelle, Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions – Properties, requirements and possibilities, *Energy and Buildings*, 43(10) (2011) 2549-256.
- [2] C. Fernandes, J. Brito, C.O. Cruz, Architectural integration of ETICS in building rehabilitation, *Journal of Building Engineering*, 5 (2016) 178-184.
- [3] R. Dylewski, J. Adamczyk, Economic and environmental benefits of thermal insulation of building external walls, *Building and Environment*, 46 (12) (2011) 2615-2623.
- [4] European Assessment Document EAD 040083-00-0404—External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS) with Renderings; European Organization for Technical Approvals: Brussels, Belgium, 2019.
- [5] CEN. EN 998-1: Specification for Mortar for Masonry. Part 1: Rendering and Plastering

- Mortar; European Committee for Standardization (CEN): Brussels, Belgium, 2010.
- [6] A. M. Freitas, Vasco Peixoto de; Miranda, Patologias de sistemas de isolamento térmico pelo exterior do tipo ETICS - LFC-IC-282A-2014, Porto - Portugal, 2014.
- [7] D. Cardoso, I. Flores-Colen, M. Pereira, P. Ferreira, P. Sequeira. L. Silva, Melhoria de desempenho do ETICS, com base em lã mineral, por homogeneização da superfície de interação entre componentes, Congresso Construção 2022 Dezembro, Guimarães, Portugal, 2022.
- [8] M. Jiříčková, Z. Pavlík, L. Fiala & R. Černý, Thermal Conductivity of Mineral Wool Materials Partially Saturated by Water, *International Journal of Thermophysics*, 27 (2006)1214–1227.
- [9] M. Jiříčková, R. Černý, Effect of hydrophilic admixtures on moisture and heat transport and storage parameters of mineral wool, *Construction and Building Materials*, 20 (2006) 425-434.
- [10] V.B. Fainerman, D. Mobius, R Miller (eds.). *Surfactants: Chemistry, interfacial properties, applications*. Elsevier, New York, 2001.
- [11] Saint-Gobain Portugal, ficha técnica webertherm pro, 2022.
- [12] Saint-Gobain Portugal, ficha técnica webertherm clima 34, 2022.
- [13]<https://surfacetreatment.lamberti.com/markets/architectural-paints/technical-data-for-paints.html>

ORCID

Inês Flores-Colen	0000-0003-4038-6748 (https://orcid.org/0000-0003-4038-6748)
Manuel Pereira	0000-0002-7932-8062 (https://orcid.org/0000-0002-7932-8062)
Luis Silva	0000-0002-0925-8572 (https://orcid.org/0000-0002-0925-8572)

Propriedades de betão drenante em misturas com agregados reciclados

Draining concrete properties in mixtures with recycled aggregates

J.M.C.B. Ximenes ^{a†}, J.L.B. Aguiar ^a, C.M.G. Jesus ^a, J.C. Pais ^b, V. Uher ^c

^a CTAC - Centro de Território, Ambiente e Construção, Universidade do Minho, Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal

^b ISISE - Instituto de Sustentabilidade e Inovação em Engenharia Estrutural, Universidade do Minho, Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal

^c Universidade de Tecnologia de Brno - Instituto de Tecnologia de Materiais de Construção e Componentes - Veveří 331/95, 602 00 Brno, República Checa

† Autor para correspondência: lebenei@yahoo.com

RESUMO

Os materiais de pavimento rígido com betão drenante, após sua construção, sofrem um processo de degradação sob a ação do tráfego e das condições climáticas. Esse processo, que ocorre durante a vida útil do piso, pode ser mais lento se for bem construído e mantido. Assim, é fundamental que a caracterização mecânica do betão seja adequada para a sua aplicação. Assim, os ensaios de trabalhabilidade e densidade devem ser realizados em relação ao betão fresco. No caso do betão endurecido, são os ensaios de resistência à compressão e flexão, os ensaios de permeabilidade e os ensaios de resistência ao desgaste. O betão permeável pode ser uma solução de segurança bem-sucedida para chuvas fortes e inundações cada vez mais frequentes. Este estudo teve como foco a obtenção de um betão permeável otimizado, dentro do escopo das normas internacionais, por meio da análise do betão feitos com as mesmas relações A/C e tempos de vibração e os diferentes percentuais de agregado reciclado. Os resultados mostram a forte influência de ambos os parâmetros sobre a distribuição de porosidade e permeabilidade e a influência negativa de porosidades mais altas sobre a resistência. O betão com relação de 0,30 W/C e tempo de vibração de 40 segundos e 20% de agregado reciclado foi selecionado por seu desempenho mecânico superior.

ABSTRACT

Rigid pavement materials with draining concrete, after construction, undergo a degradation process under the action of traffic and weather conditions. This process, which occurs during the life of the floor, can be slower if it is well constructed and maintained. Thus, it is essential that the mechanical characterization of the concrete is suitable for its application. Thus, workability and density tests must be carried out in relation to fresh concrete. In the case of hardened concrete, these are compressive and flexural strength tests, permeability tests and wear resistance tests. Pervious concrete can be a successful safety solution for heavy rains and increasingly frequent floods. This study focused on obtaining an optimized pervious concrete, within the scope of international standards, through the analysis of concrete made with the same W/C ratios and vibration times and different percentages of recycled aggregate. The results show the strong influence of both parameters on porosity and permeability distribution and the negative influence of higher porosities on strength. Concrete with a W/C ratio of 0.30 and a vibration time of 40 seconds and 20% recycled aggregate was selected for its superior mechanical performance.

Palavras-chave:

Betão permeável,
porosidade,
resistência,
durabilidade

Keywords:

Pervious concrete,
porosity, strength,
durability

1. Introdução

Em relação aos agregados reciclados, tem sido feito um esforço para aumentar o conhecimento sobre este material, para encontrar uma forma mais adequada de o utilizar. A incorporação de materiais reciclados no betão tem sido uma forma de atingir esse objetivo, pois a cada ano são produzidas toneladas de RCD (resíduos de construção e demolição) para o desenvolvimento da cidade. Com base na prevenção ambiental, os RCD são reciclados para uso na construção de pisos. Neste caso são utilizados para pavimentação de estradas [1].

A necessidade de reaproveitar esses resíduos se mostra de extrema importância tanto para a esfera ambiental em que os impactos causados ao meio ambiente são amenizados, quanto por questões econômicas. Neste estudo, que analisa a viabilidade de reaproveitamento de resíduos de construção, observa-se que há uma garantia em relação aos parâmetros de sustentabilidade [2].

Os sistemas de betão permeável permitem a recarga natural das águas subterrâneas e deixam a água evaporar do subsolo [3,4]. Além disso, os benefícios do pavimento de betão permeável incluem absorção acústica [5], diminuição do aquecimento superficial e efeito Ilha de Calor Urbano [6] e filtragem dos contaminantes na água [7].

Para reduzir os efeitos negativos das superfícies impermeáveis, o betão permeável surgiu como uma boa alternativa com sua estrutura porosa. Geralmente, o betão permeável possui baixa resistência devido à sua estrutura porosa, portanto seu uso em estradas de alto volume é muito limitado até ao momento. Muitos estudos têm sido realizados para aumentar a resistência mecânica do betão permeável. Existem basicamente dois métodos diferentes para aumentar a resistência do betão permeável. A primeira é aumentar a quantidade de ligante e a segunda é aumentar a resistência da pasta de cimento [8]. Em muitos estudos, agregados de menor tamanho têm sido usados para aumentar a resistência do betão permeável, aumentando a quantidade de ligante e verificou-se que a resistência mecânica aumenta com o uso de agregados de menor tamanho [8].

A permeabilidade prévia do betão varia de 11% a 35%, enquanto a porosidade varia de 15% a 25% [9]. A National Ready Mix Concrete Association (NRMCA) aponta um valor mínimo recomendado de porosidade de 15% [10].

O betão permeável proporciona vários benefícios ambientais importantes, como a redução do efeito de ilhas de calor urbanas, o reabastecimento de aquíferos e a redução efetiva do escoamento de águas pluviais [11].

Com grande importância e uso crescente em diferentes tipos de construção, os betões permeáveis são referenciados na Storm Water Technologies Fact Sheet Bioretention da United States Environmental Protection Agency para gerenciamento de escoamento de águas pluviais [12].

A resistência mecânica do betão permeável é inversamente proporcional à porosidade [13], ou seja, à medida que a porosidade aumenta, a resistência diminui. Portanto, é previsível uma variabilidade substancial em relação à resistência e desempenho estrutural, uma vez que ambos os parâmetros dependem diretamente da porosidade [14].

Sólidos avanços de conhecimento podem ser encontrados na literatura sobre o tema. Montes et al. [15] desenvolveram ensaios para determinar a porosidade, enquanto Zouaghi et al. [16] e Olek et al. [17] analisaram parâmetros mecânicos. O autor posterior [17] e Neithalath et al. [18] examinaram e caracterizaram os parâmetros acústicos do material.

Embora a porosidade seja amplamente aceite como um indicador de permeabilidade do pavimento, Neithalath et al. [18] demonstraram que outros parâmetros devem ser analisados para uma previsão precisa da permeabilidade.

Na literatura, para melhorar a qualidade dos agregados reciclados e o desempenho do betão agregado reciclado, destacam-se os três principais métodos técnicos: (i) remoção de argamassa de cimento residual [19 - 24], (ii) revestimento de agregados reciclados [25 - 30], (iii) métodos de mistura de betão em várias etapas com misturas pozolânicas [31 - 37]. Xuan et al. [38] relataram que o tratamento dos agregados reciclados por métodos de mistura de betão em várias etapas com aditivos pozolânicos é uma maneira eficiente e prática, em vez da remoção de argamassa velha aderida ou revestimento de agregados reciclados, que eram caros e demorados métodos com impactos ambientais secundários. Kisku et al. [37] investigaram as propriedades

mecânicas do betão agregado reciclado produzido com diferentes métodos de mistura de betão.

Devido às suas várias vantagens, os pavimentos de betão são amplamente utilizados em todo o mundo [39]. Para projetar os pavimentos de betão, vários métodos de projeto [40 - 44], são usados em diferentes países. Na maioria dos guias de projeto [40, 41 e 43], a fadiga da laje de betão e a erosão do suporte da laje são dois casos de falha comuns considerados no projeto. O projeto é feito para determinar a espessura da laje necessária para resistir à aplicação repetida de cargas por eixo durante a vida útil do pavimento. Além disso, a resistência à flexão, o módulo de elasticidade e a densidade são as propriedades importantes do betão usadas para determinar a espessura necessária do pavimento. Uma vez que as propriedades dos agregados, usados para preparar as misturas em betão, têm um impacto importante nas propriedades do betão usado no projeto, os valores de espessura necessários podem alterar significativamente com base no tipo de agregado usado.

Alcançar uma proporção adequada entre poros e desempenho mecânico levará a um betão permeável otimizado projetado para atender a requisitos específicos de desempenho. Portanto, para projetar um betão permeável otimizado utilizável em todos os locais com déficit de drenagem de água, é necessário conhecimento científico inovador relacionado à permeabilidade e distribuição de poros.

Assim, o objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um betão permeável apto a ser aplicado em pavimentos rodoviários de betão com incorporação de agregados reciclados. O desempenho do betão permeável será avaliado por: i) características do betão fresco sobre trabalhabilidade através dos ensaios de abaixamento e Vêbê, densidade do betão fresco e teor de vazios de ar; ii) ensaios de betão endurecido; permeabilidade, porosidade por imersão, resistência à compressão, resistência à tração, ensaio de resistência à flexão.

2. Materiais e métodos

2.1. Materiais

Os betões permeáveis foram produzidos a partir de cimento, agregados finos e grossos, agregados reciclados e água. Os agregados foram produzidos por um processo específico para obtenção de grãos esféricos ou agregados arredondados (processo de base empírica), permitindo uma distribuição uniforme dos diferentes tamanhos de partículas no betão.

Considerando que o aumento da porosidade é acompanhado pela diminuição da resistência do betão permeável, a seleção do ligante é de vital importância. Foi utilizado cimento Portland (CEM I 42,5 R) [45], com as resistências à flexão e compressão tabela 1.

Tabela 1 - Resistência do Cimento Portland CEM I 42,5 R [45].

Idade (dias)	Resistência (MPa)	
	Flexão	Compressão
2	5.6	31.8
7	7.5	47.0
28	8.5	55.5

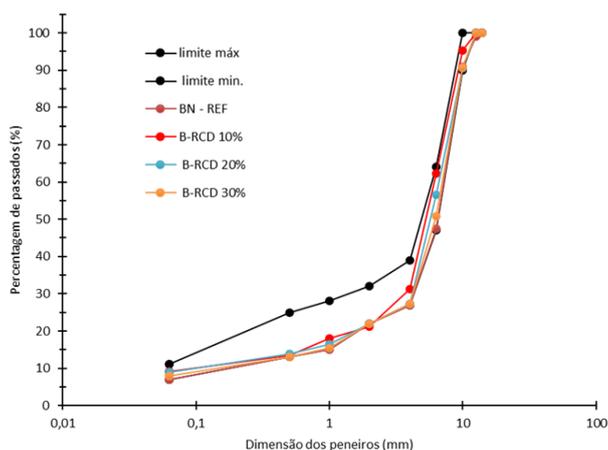
Os agregados utilizados na produção do betão foram uma mistura de fino (Agregado 0/4 mm), e agregado grossos normal e reciclado (Agregado 4/10 mm e agregado 10/14 mm) que permitiu obter a distribuição granulométrica apresentada na Tabela 2 e Fig. 1, que segue as Especificações de Construção Portuguesas [46], e as propriedades dos agregados na Tabela 3.

Tabela 2 - Distribuição de tamanho de partícula agregado.

Abertura da peneira (mm)	0.063	4	10	14	16
Passagem Cumulativa (%)	1,5	13.5	45,9	39,1	100

Tabela 3 - Propriedades físicas do agregado.

Propriedade	Unidades	Padrão	Agregados		
			0/4	4/10	10/14
Densidade	kg/m ³	EN 1097-6:2016 [47]	2670	2660	2620
Resistência à fragmentação agregado normal	%	EN 1097-2:2011 [48]	-	20.64	23.17
Densidade	kg/m ³	EN 1097-6:2016 [47]	2670	2273	2242
Resistência à fragmentação Reciclado RCD	%	EN 1097-2:2011 [48]	-	36.16	36.9

**Figura 1** - Distribuição granulométrica de agregados normais e reciclados no fuso de misturas drenantes PA 12.5 (BBd) Betão betuminoso drenante [46].

Os betões permeáveis foram preparados para uma razão (A/C), respetivamente 0,30 e submetidos a tempos de vibração de 40 segundos. Com uma composição mostrada na tabela 4. Diferentes tipos dos provetes do ensaio de betão foram feitos. Para cada tipo de betão poroso foram confeccionados 9 provetes do ensaio cúbicos (150x150x150 mm), 9 (100x100x100 mm) e 9 prismáticos (100x100x400 mm), 4 (400x400x80 mm) e 4 (400x300x80 mm). O aspeto dos provetes do ensaio pode ser observado na fig. 2.

Tabela 4 - Misturas de betão permeável.

No. dos betões	Designação dos betões	CEM I 42,6	Ag. 0/4	Ag. 4/10	Ag. 10/14	RCD 4/14
1	BN-REF	300,0	22,0	1391,0	314,0	0
2	B-RCD 10%		22,9	1091,1	160,5	184,0
3	B-RCD 20%		22,6	929,6	136,8	368,0
4	B-RCD 30%		22,4	769,0	112,9	551,0

NB: A/C de 0,30 e Vibração de 40 segundos



Figura 2 - Aspetto dos provetes do ensaio confeccionados para relações de 0,35 W/C e 40 vibrações em segundos.

2.2. Metodologia

A metodologia de todos os ensaios é baseada na norma europeia. As etapas da preparação dos provetes na câmara de cura são os dimensionamentos do tipo de betão permeável e a marcação, para os ensaios de diferentes tipos de betões permeáveis produzidos em laboratório são as regras para guiar e avaliar com os seguintes procedimentos: i) ensaios de betão fresco para definir a trabalhabilidade através dos ensaios de; a) abaixamento b) Vêbê c) densidade do betão fresco e d) teor de ar. ii) ensaios do betão endurecido para analisar as resistências com os seguintes ensaios de; a) permeabilidade, b) porosidade por imersão, c) resistência à compressão, d) resistência à tração, e) resistência a flexão, f) desgaste com máquina de Los Angeles por cântabro.

O cone de Abrams convencional de slump ou abaixamento e o ensaio de trabalhabilidade e foi utilizado para avaliar o comportamento reológico do betão. O ensaio de queda seguiu a EN 12350-2 :2019 (Norma Europeia) [49].

O ensaio de Vêbê baseado na norma de EN 12350-3 2019 [50]. Um cone de queda foi colocado no recipiente do cilindro do equipamento de ensaio Vêbê. O betão foi derramado no cone, levantado verticalmente para verificar a queda do betão, uma vez preenchido. O resultado é o tempo, em segundos, necessário para moldar completamente o betão após o disco colocado no topo do betão e o vibrador elétrico acionado.

O betão fresco foi testado analisando e correlacionando a densidade fresca (EN 12350-6 :2019) [51] com o teor de ar (EN 12350-7 :2019) [52]. A densidade do betão fresco foi calculada usando a massa e o volume do recipiente conhecido. O mesmo recipiente foi usado para determinar o teor de ar do betão fresco.

Os ensaios de betão endurecido foram realizados utilizando os provetes do ensaio envelhecidos por 28 dias. Os diferentes tipos de provetes do ensaio foram ensaiados para caracterização física e mecânica, utilizando os procedimentos de acordo com a norma para cada tipo de ensaio realizado.

a) A permeabilidade do betão foi caracterizada e avaliada através da determinação do coeficiente de permeabilidade KFH (Coeficiente de queda de cabeça), segundo a norma NLT-327/00 (Norma del Laboratorio de Transporte) [53] Seguindo Neithalath et al. [54] e o padrão ACI 522R-10 (American Concrete Institute) [55], o ensaio Falling Head Permeability foi utilizado para este fim, provetes do ensaio cilíndricos (100 mm de diâmetro e 200 mm de altura) foram usados para ensaiar cada betão. Foram utilizados três provetes do ensaio para cada betão.

b) Para os ensaios de porosidade foram escolhidos provetes do ensaio para analisar a absorção de água por imersão no betão produzido, o cubo com dimensão de 100x100x100 mm com 28 dias de cura. O procedimento de ensaio foi adaptado, conforme NP 581-1969 [56], seguindo cuidadosamente todos os procedimentos de ensaio. Os provetes do ensaio foram colocados no recipiente com água de forma que ficassem imersos em 1/3 de sua altura, por um período de 24 horas; Os provetes do ensaio foram pesados até a condição de superfície saturada até a condição de massa seca e secos em estufa ventilada à temperatura de 110 ± 5 °C até massa constante e as massas para o cálculo foram registradas.

c) Foi utilizado equipamento hidráulico para determinar a resistência à compressão do

betão, cumprindo todas as instruções de acordo com a norma EN 12390-3 [57]. No caso deste ensaio, foi aplicada uma velocidade de 13,5 kN/s de acordo com o tamanho do provete de 150x150x150 mm.

d) Para o ensaio de tração os provetes do ensaio são cilíndricos de acordo com a norma EN 12390-1 [58], mas uma relação altura e diâmetro deve ser aceita pelas normas, EN 12350-1 [59] e EN 12390-2 [60] e EN 12390-6 [61] sobre a determinação da resistência à tração de provetes do ensaio.

e) Os provetes do ensaio para o ensaio de flexão são prismas de 100 x 100 x 400 mm conforme EN 12390-1 [58] e EN 12390-5 [62] e o procedimento segue as instruções da norma.

3. Resultados

3.1. Ensaio de betão fresco

A trabalhabilidade do betão foi avaliada pelos ensaios de abaixamento e vêbê (fig.3). Os resultados dos abaixamentos são 0 mm, e o Vêbê varia de 6,3 a 9,8 segundos, conforme mostrado na tabela 5 e o resultado mostra de normal trabalhabilidade. O aumento dos agregados reciclados reduz o resultado do ensaio Vêbê por isso definimos as percentagens do agregado reciclados para a analisar. Como os resultados do abaixamento, não foi possível estabelecer uma correlação entre os parâmetros de trabalhabilidade dos betões estudados.



Figura 3 - a) Equipamento de ensaio Vêbê, b) Ensaio Vêbê real.

Na Fig. 4 apresenta-se os resultados do ensaio de Vêbê, densidade do betão fresco e teor de ar. O teor de vazios de ar varia entre 3,2 a 8%, e a densidade varia entre 1973,3 kg/m³ a 2139 kg/m³, esses valores são consistentes com a literatura para betão permeável e mostrados em (Fig. 4a, 4b e 4c).

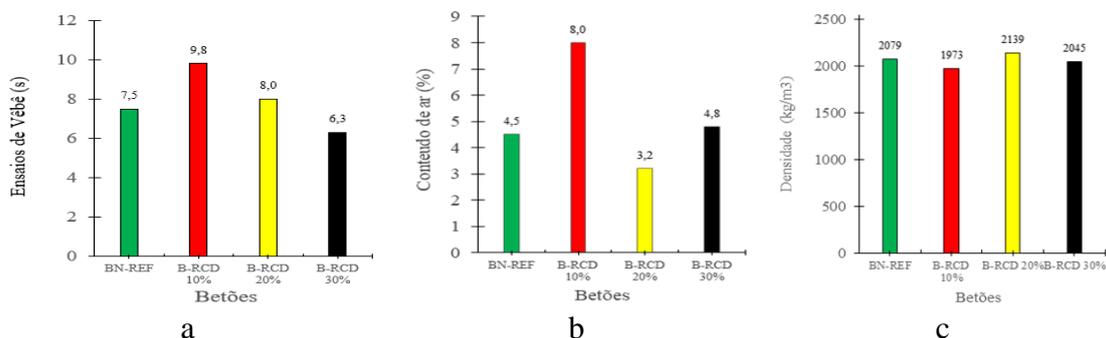


Figura 4 - Resultado do betão fresco a) ensaio de vêbê, b) conteúdo de ar, c) densidade do betão fresco.

Os resultados dos abaixamentos são zero e os valores médios dos resultados do ensaio de Vêbê estão entre 10 - 6 segundos para o ensaio de betão referência e betões de B-RCD (Fig.4). A melhor trabalhabilidade é verificada para betão de referência e para betão com maior percentagem de RCD. Isso se deve ao tamanho maior dos agregados reciclados em comparação com os

agregados normais (Fig. 4a).

Os valores apresentados na tabela 5 também mostram que o teor de vazios de ar é semelhante para 20%, 30% dos betões reciclados e de referência. Com 10% reciclado possuindo maior teor de vazios de ar, devido à maior porosidade desta mistura. Causada pela trabalhabilidade reduzida (Fig. 4b). As densidades das misturas são semelhantes com um valor menor para 10% de agregado reciclado confirmando a maior porosidade.

2.2. Ensaio de Permeabilidade do betão endurecido

Em relação a permeabilidade tem três ensaios de permeabilidade de KLCS (Coefficient Laboratories de Caminos de Santander), permeabilidade de KFH (Coefficient Falling Head) e permeabilidade conforme a Porosidade.

A permeabilidade do betão foi avaliada pelo ensaio de coeficiente KLCS conforme descrito na metodologia. Os resultados do ensaio são mostrados na tabela 6 e na fig. 5. Esses resultados de permeabilidade estão entre 4,6 a 12,9 mm/s expressos em função do fluxo de água. O betão com agregado reciclado apresenta menor permeabilidade devido à maior absorção de água desses agregados.

Os resultados das Tabelas 6 e Figuras 5a mostram os resultados entre 20 e 34 segundos, de acordo com o padrão. A permeabilidade do betão diminui com a incorporação de agregados reciclados devido à maior absorção de água desses agregados.

A permeabilidade obtida com o ensaio Falling Head Permeability (KFH) está indicada na Tabela 6 e Fig. 5 com os resultados de 2,5 -12 mm/s. Em comparação, o menor fluxo de água foi com agregado reciclado, e a referência é maior. No entanto, todos os testes estão na faixa de 11-35 segundos de acordo com a norma NLT-327/00 [53].

Os resultados da porosidade por imersão são mostrados na tabela 6 variam entre 18,6% e 21,9% e a Fig. 5 é uma comparação com padrão. Os menores valores foram alcançados pelo betão de BN-REF e os maiores pelo betão B-RCD. A porosidade por imersão se mantém com o aumento da proporção de agregado reciclado, o que significa que a porosidade aberta é semelhante.

Na Tabela 6 são apresentados a porosidade e o volume de vazios do betão com B-RCD. Há uma tendência de diminuição do volume de vazios com a incorporação de RCD. Isso se deve à maior absorção de água dos agregados reciclados. Na fig. 6 mostra os resultados normais em comparação com os ensaios do padrão e autores nos artigos publicados.

Na Fig. 7 é mostrada uma comparação entre as porosidades do padrão e os resultados de outro país na citação da autora Vanessa M. K. Há uma tendência para que as porosidades deste estudo sejam menores. Isto é devido à presença de agregados reciclados.

Tabela 6 - Resultado do Ensaio de permeabilidade e porosidade.

Betões	Permeabilidade K_{LCS}		Permeabilidade	Porosidade por
	Laje (mm/s)	Cubo (mm/s)	K_{FH} (mm/s)	Imersão (%)
BN-REF	28,9	12,9	12,0	18,6
B-RCD 10%	19,9	10,4	10,0	21,9
B-RCD 20%	19,6	4,6	2,5	18,6
B-RCD 30%	34,0	4,8	3,9	19,4

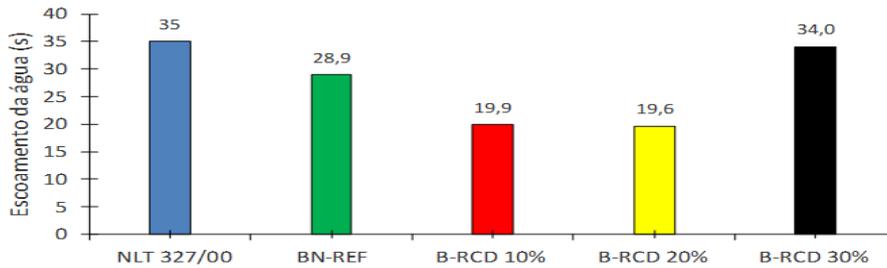


Figura 5 - Comparação do escoamento da água com o padrão [53].

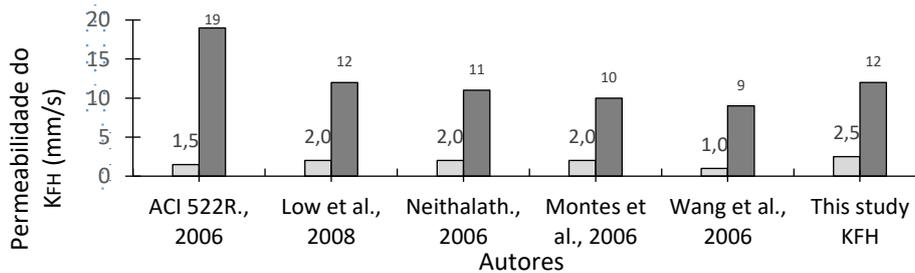


Figura 6 - Comparação da permeabilidade do KLCS e KFH com o padrão [55] e autores [63], [54], [64], [29].

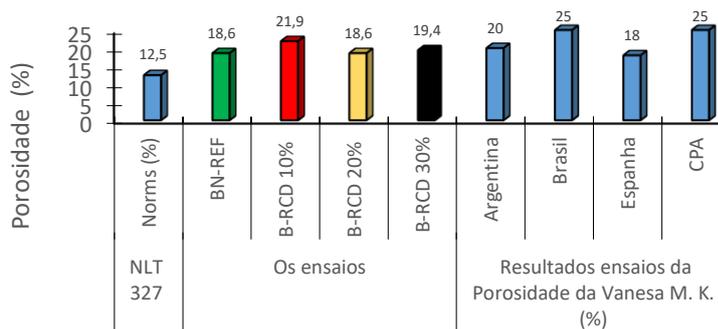


Figura 7 - Comparação da porosidade com a norma [53] e resultados da Autora Vanesa [65].

3.3. Ensaios mecânicos do betão endurecido

A Tabela 7 mostra os resultados de resistência à compressão para cada betão ensaiado. Com uma faixa de valores entre 8,9 a 21,7 MPa, os resultados mostram que os betões ensaiados atendem aos requisitos técnicos quanto ao parâmetro de resistência à compressão para pavimentos permeáveis.

Esses resultados mostram que os betões de referência atingiram maiores valores de resistência à compressão devido ao uso de agregados normais. Em relação aos resultados para o teor de vazios, os valores estão na faixa entre 18,6% e 21,9%. (Tabela 6).

Os valores obtidos para o betão com agregado reciclado estão abaixo do valor de 21,7 MPa. Isto está de acordo com a resistência à compressão obtida por autor A. Bonicelli [66].

Os ensaios de resistência à tração dos provetes do ensaio são cilíndricos de acordo com a EN 12390-1 [56], mas uma relação altura e diâmetro deve ser aceita pelas normas. EN 12390-2 [33] e 12390-6:2003 [59]. Os resultados mostram o valor entre 1,5 a 2,0 MPa. Isto está de acordo com o valor obtido por autor A Bonicelli [66].

Os ensaios de resistência à flexão nos provetes do ensaio são paralelepípedicos de acordo com a norma EN 12390-5, [60] mas a relação comprimento/largura e espessura deve ser aceita pelas normas. Verificou-se que para cada mistura de betão de BN-REF e B-RCD os resultados estão entre 2,1 a 4,3 MPa, conforme Tabela 7 e Fig. 10. A comparação com os resultados de autor

Cosic et al [67] mostra que o resultado é semelhante.

Tabela 7 - Resultados dos ensaios mecânicos

Misturas	Resistência à Compressão (MPa)	Resistência à Tração (MPa)	Resistência à Flexão (MPa)	Módulo de elasticidade dinâmica (MPa)
Ref	21.7	1.5	4.3	3.96
10% RCD	8.9	1.6	2.1	2.51
20% RCD	18.6	2.0	3.7	3.67
30% RCD	16.7	1.9	3.6	3.25

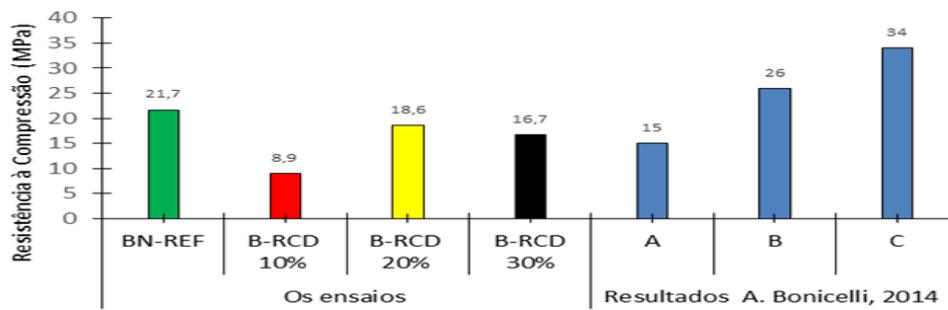


Figura 8 - Comparação do resultado da resistência à compressão.

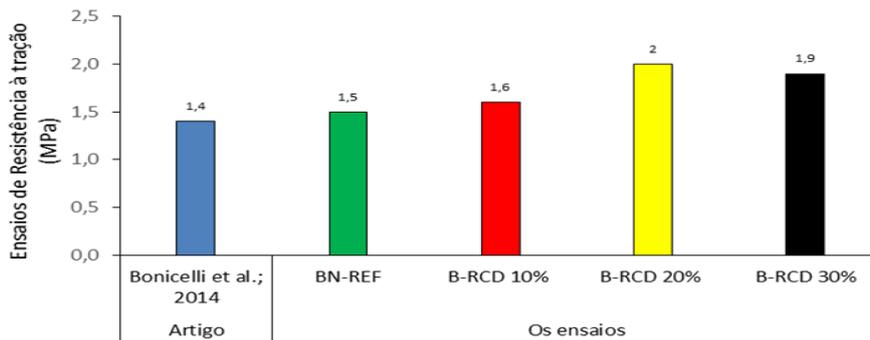


Figura 9 - Comparação do resultado dos ensaios de resistência à tração.

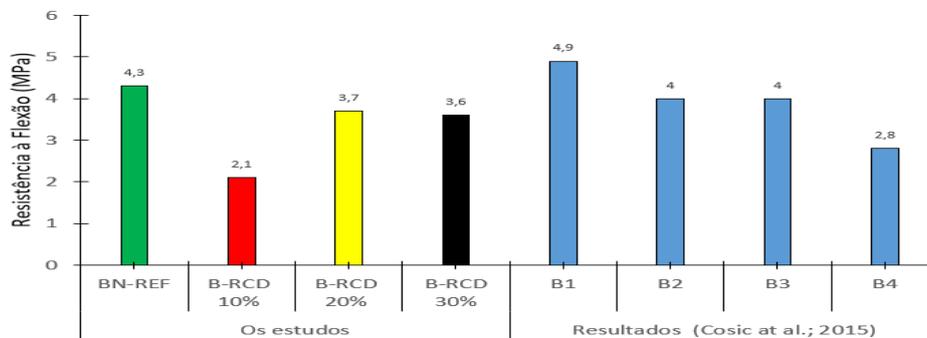


Figura 10 - Comparação do resultado do ensaio de resistência à flexão.

4. Discussão

A necessidade de reaproveitamento desses resíduos revela-se de extrema importância tanto para o meio ambiente, quanto por questões econômicas e em relação aos parâmetros de sustentabilidade.

Neste, análise dos ensaios, em geral os resultados apresentam “quanto maior a porosidade, menor será a resistência mecânica e maior a permeabilidade” e assim ao contrário.

5. Conclusões

Este artigo projetou e ensaiou três tipos dos betões de RCD (Resíduos de construção e demolição) com uma referência de betão permeável BN-REF para obter betão otimizado para pavimentação de estradas e melhorar a segurança removendo rapidamente as águas pluviais de sua superfície. Do estudo, foi possível concluir que:

- Os ensaios de abaixamento não permitiram estabelecer qualquer correlação entre os betões estudados porque o valor é 0 mm. No entanto, com base nos resultados do ensaio de Vêbê, a trabalhabilidade aumenta com a incorporação de agregados reciclados devido ao seu maior tamanho em relação aos agregados normais e reciclados.

- Em relação às variações dos parâmetros de permeabilidade em cada proporção de quatro misturas, detetou-se que os diferentes tipos dos betões de B-RCD influenciam neste parâmetro. No entanto, os resultados estão dentro dos limites da norma NLT -327/00 e EN 13108-7:2013. Assim também, os ensaios de permeabilidade do coeficiente de Falling Head KFH coeficiente do padrão ACI 522R-10

- Os volumes vazios ou porosidade, os valores estão entre 18,59 a 21,94% significa que está dentro dos limites da norma NP 581-1969.

- Pelos resultados apresentados e discutidos neste artigo, o betão permeável foi identificado como otimizado devido ao seu desempenho físico e mecânico, respeitando as especificações de permeabilidade.

- Os ensaios de caracterização mecânica mostraram que o betão de referência obteve maior resistência à compressão em relação à mistura RCD. Devido ao uso de materiais normais, o resultado apresentou a maior resistência à compressão (21,7 MPa). Os betões de B-RCD 30% resultam no resultado mais alto devido à porosidade mais baixa.

- Com valores que variam de 8,9 MPa a 21,7 MPa, foi comprovado que todos os betões ensaiados atendem aos requisitos de resistência à compressão do betão permeável.

- A necessidade de reaproveitamento desses resíduos revela-se de extrema importância tanto para o meio ambiente, quanto por questões econômicas e em relação aos parâmetros de sustentabilidade.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pela Adenda nº 20 ao Protocolo de Cooperação Cultural, Científica, Pedagógica e Institucional entre a Universidade do Minho e a Universidade Nacional de Timor Lorosa'e. O primeiro autor agradece o apoio da Universidade Nacional de Timor Lorosa'e esta investigação foi concluída com sucesso.

Referências

- [1] Leandro M. Souza, Cleber D. Assis, Silvia B. G. Souto, Agregado reciclado: um novo material da construção civil, 2014 <https://periodicos.ufsm.br/reget/article/viewFile/11297/pdf>.
- [2] A. Vanacker, Recycling of concrete at precast concrete plant, Paris, juliet, 55-67, 1996.
- [3] United States Environmental Protection Agency, <http://www.epa.gov>
- [4] E. Nemirovsky, A. Welker, R. Traver, Evaporation from a previous concrete stormwater control measure: parameterization, quantifying, and evaluation, World Environmental and Water Resources Congress (2011) 3610-3619.
- [5] N. Neithalath, J. Weiss, J. Olek, Characterizing enhanced porosity concrete using electrical

- impedance to predict acoustic and hydraulic performance, *Cement and Concrete Research* 36 (2006) 2074-2085.
- [6] L. Haselbach, M. Boyer, J.T. Keavern, V. Schaefer, Cyclic heat island impacts on traditional versus pervious concrete pavement systems, *Transport research Records* 2240 (2011) 107-115.
- [7] J. Luck, S. Workman, M. Coyne, S. Higgins, Solid material retention and nutrient reduction properties of pervious concrete mixture, *Biosystems Engineering* 100 (2008) 401-408.
- [8] J. Yang, G. Jiang, Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials, *Cem. Concr. Res.* 33 (2003) 381–386, [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00966-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00966-3).
- [9] CIP 38 - Pervious Concrete, National Ready Mixed Concrete, NRMCA, 66 Canal Center Plaza, Suite 250, Alexandria, VA 22314, 2004. <https://www.nrmca.org/>.
- [10] B. Debnath, P.P. Sarkar, Pervious concrete as an alternative pavement strategy: a state-of-the-art review, *Int. J. Pavement Eng.* 8436 (2018). <https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1554217>.
- [11] S.V. Bittencourt, M. da Silva Magalhães, M.E. da Nóbrega Tavares, Mechanical behavior and water infiltration of pervious concrete incorporating recycled asphalt pavement aggregate, *Case Stud. Constr. Mater.* 14 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00473>.
- [12] Epa, Storm Water Technology Fact Sheet Bioretention, Epa. (1999) 8. <https://doi.org/832-F-99-006>.
- [13] O. Deo, N. Neithalath, Compressive behavior of pervious concretes and a quantification of the influence of random pore structure features, *Mater. Sci. Eng. A.* 528 (2010) 402–412. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.09.024>.
- [14] L. Crouch, M. Cates, V. Dotson, K. Honeycutt, D. Badoe, Measuring the Effective Air Void Content of Portland Cement Pervious Pavements, *Cem. Concr. Aggregates*, 25 (2003) 1–5. <https://doi.org/10.1520/CCA10516J>.
- [15] S.W. Dean, F. Montes, S. Valavala, L. Haselbach, A New Test Method for Porosity Measurements of Portland Cement Pervious Concrete, *J. Astm Int.* 2 (2005). <https://doi.org/10.1520/JAI12931>.
- [16] A. Zouaghi, M. Kumagai, T. Nakazawa, Fundamental study on some properties of pervious concrete and its applicability to control stormwater run-off, 22 (2000) 43–50.
- [17] J. Olek, W.J. Weiss, N. Neithalath, A. Marolf, E. Sell, W. Thornton, Development of quiet and durable porous Portland cement concrete paving materials, (2003). <https://rosap.nrl.bts.gov/view/dot/16086>.
- [18] W.D. Martin, N.B. Kaye, B.J. Putman, Impact of vertical porosity distribution on the permeability of pervious concrete, *Constr. Build. Mater.* 59 (2014) 78–84. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.034>.
- [19] Tam, V. W. Y., Tam, C. M., and Le, K.N, Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches. *Resources, Conservation and Recycling*, 50(1) (2007) 82–101.
- [20] S. Ismail, M. Ramli, Engineering properties of treated recycled concrete aggregate (RCA) for structural applications. *Construction and Building Materials*, 44 (2013) 464–476.
- [21] P. Saravanakumar, K. Abhiram, B. Manoj, Properties of treated recycled aggregates and its influence on concrete strength characteristics. *Construction and Building Materials*, 111 (2016) 611–617.
- [22] Y. Kim, et al., Properties enhancement of recycled aggregate concrete through pretreatment of coarse aggregates-comparative assessment of assorted techniques. *Journal of Cleaner Production*, 191 (2018) 339–349.
- [23] F. Kazemian, H. Rooholamini, A. Hassani, Mechanical and fracture properties of concrete containing treated and untreated recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 209 (2019) 690–700.
- [24] H. Dilbas, Ö. Cakır, H. Yildirim, An experimental investigation on fracture parameters of recycled aggregate concrete with optimized ball milling method. *Construction and Building Materials*, 252 (2020) 119118.
- [25] E. Güneş, et al., Effect of surface treatment methods on the properties of self-compacting concrete with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 64 (2014) 172–183.

- [26] Y. C. Liang, et al., Development of processing methods to improve strength of concrete with 100% recycled coarse aggregate. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(5) (2015) 04014163.
- [27] C. Shi, et al., Performance of mortar prepared with recycled concrete aggregate enhanced by CO₂ and pozzolan slurry. *Cement and Concrete Composites*, 86 (2018) 130–138.
- [28] W. M. Shaban et al., Properties of recycled concrete aggregates strengthened by different types of pozzolan slurry. *Construction and Building Materials*, 216 (2019) 632–647.
- [29] J. Wang et al., Comparison of recycled aggregate treatment methods on the performance for recycled concrete. *Construction and Building Materials*, 234 (2020) 117366.
- [30] W. M. Shaban et al., Effect of pozzolan slurries on recycled aggregate concrete: mechanical and durability performance. *Construction and Building Materials*, 276 (2021) 121940.
- [31] V. W. Y. Tam, C. M. Tam, Assessment of durability of recycled aggregate concrete produced by two-stage mixing approach. *Journal of Materials Science*, 42(10) (2007) 3592–3602.
- [32] J. Li, H. Xiao, Y. Zhou, Influence of coating recycled aggregate surface with pozzolanic powder on properties of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 23 (2009) 1287–1291.
- [33] S. Pradhan, S. Kumar, S. Barai, Recycled aggregate concrete: Particle packing method (PPM) of mix design approach. *Construction and Building Materials*, 152 (2017) 269–284.
- [34] W. Zhang, et al., Effect of the optimized triple mixing method on the ITZ microstructure and performance of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 203 (2019) 60.
- [35] Y. Yue, et al., An industrial applicable method to improve the properties of recycled aggregate concrete by incorporating nano-silica and micro-CaCO₃. *Journal of Cleaner Production*, 259 (2020) 120920.
- [36] N. Kisku, et al., Development of durable concrete from C&D waste by adopting identical mortar volume method in conjunction with two-stage mixing procedure. *Construction and Building Materials*, 256 (2020) 119361.
- [37] N. Kisku, et al., Microstructural investigation of recycled aggregate concrete produced by adopting equal mortar volume method along with two stage mixing approach. *Structures*, 24 (2020) 742–753.
- [38] D. Xuan, B. Zhan, C. Poon, Assessment of mechanical properties of concrete incorporating carbonated recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 65 (2016) 67–74.
- [39] Y. Abut et al., A comparative study on the performance of RCC for pavements casted in laboratory and field. *International Journal of Pavement Engineering*, (2020) 1–14. <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1823391>.
- [40] Portland Cement Association, Thickness design for concrete highway and street pavements. Skokie, IL: PCA, USA, 1984.
- [41] AASHTO, Guide for design of pavement structures. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993.
- [42] CROW, Design software for concrete roads (VENCON 2.0, CD ROM D925) [Computer softw], 2004.
- [43] AASHTO, Mechanistic empirical pavement design guide. A manual of practice-interim edition. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2008.
- [44] Indian Roads Congress, 2015. Guidelines for the design of plain jointed Rigid pavements for highways. In: IRC 58, Indian Roads Congress, New Delhi, India, June, Fourth revision, 2015.
- [45] SECIL, Supratek Cimento Portland, Fábrica Maceira-Liz, 2018.
- [46] EP - Estradas de Portugal, Pavimentação Características dos materiais, Cad. Encarg. Tipo Obra. 03 (2014) 125.
- [47] NP EN 1097-6:2000. Test for mechanical and physical properties of aggregate part 6: Determination of particles density and water absorption, 2000.
- [48] NP EN 1097-2:2002. Los Angeles Machine Wear Resistance Test Instituto Português da Qualidade, p. Caparica, Lisboa, 2002.
- [49] EN 12350-2, Testing fresh concrete. Slump test, BSI. 2019.
- [50] EN 12350-3, Testing fresh concrete. VB test, 2019.

- [51] EN 12350-6, Testing fresh concrete. Density, 2019.
- [52] EN 12350-7, Testing fresh concrete. Air content. Pressure methods, 2019.
- [53] NLT-327/00, Permeabilidade in situ de pavimentos drenantes mediante permeámetro LCS, Espana, 2000.
- [54] N. Neithalath, J. Weiss, J. Olek, Predicting the Permeability of Pervious Concrete (Enhanced Porosity Concrete) from Non-Destructive Electrical Measurements, ResearchGate. (2006) 1–22.
- [55] ACI 522R-06, Pervious Concrete, 2010.
- [56] NP- 581:1969, Determination of volumic masses and water absorption of aggregates and stones; standard written in Portuguese, 1969.
- [57] EN 12390-3, 2003. Testing hardened concrete. Compressive strength of test specimens, BSI. (2019) 24. standard written in portuguese.
- [58] EN. 12390-1: 2003, Tests of hardened concrete part 1: Shape, dimensions and other requirements for testing specimens and molds, 2003; standard written in portuguese.
- [59] EN. 12350-1: 2002, Fresh Concrete Tests Part 1: Sampling, 2002; standard written in portuguese.
- [60] EN. 12390-2, Tests of hardened concrete. Part 2: Execution and curing of specimens for mechanical strength tests. 2009; standard written in portuguese-
- [61] IPQ, NP EN 12390-6, Tests of hardened concrete - Part 6: Tensile strength by compression of specimens. for. 14, 2003: standard written in portuguese.
- [62] NP EN 12390-5, Hardened concrete, bending strength pdf.
- [63] Low K, Harz D, Neithalath N. Statistical characterization of the pore structure of enhanced porosity concrete, Proceedings in CD of the 2008 Concrete Technology Forum, Denver, National Ready Mix Concrete Association, 2008.
- [64] Montes, L. Haselbach, Measuring hydraulic conductivity in pervious concrete, Environ. Eng. Sci., 23 (2006) 960–969.
- [65] V. D. L. F. Francisco, A Drenagem Superficial e o seu Impacto Funcional e Estrutural na Vida dos Pavimento, Universidade de Porto, 2009.
- [66] A. Bonicelli, F. Giustozzi, M. Crispino, M. Borsa, Investigation on the functional and mechanical performance of differentially compacted pervious concrete for road pavements, (2014) 265–272.
- [67] K. Ćosić, L. Korat, V. Ducman, I. Netinger, Influence of aggregate type and size on properties of pervious concrete, Constr Build Mater 78 (2015) 69-79. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.073>.

ORCID

J.M.C.B. Ximenes	0000-0002-5749-553X (https://orcid.org/0000-0002-5749-553X)
J.L.B. Aguiar	0000-0003-3954-5721 (https://orcid.org/0000-0003-3954-5721)
C.M.G. Jesus	0000-0001-5119-3867 (https://orcid.org/0000-0001-5119-3867)
J.C. Pais	0000-0002-7555-1195 (https://orcid.org/0000-0002-7555-1195)

Micro-indicadores de Circularidade para o Setor de Construção Civil na Perspetiva de Produtos Plásticos

Circularity Micro-Indicators to Building and Construction Sector: Plastic Products Perspective

Joana Matos^{a†}, Carla I. Martins^a, Carla L. Simões^b, Ricardo Simões^{a,b}

^a *Instituto de Polímeros e compósitos (IPC), Universidade do Minho, 4800-058 Guimarães, Portugal*

^b *Instituto Politécnico do Cávado e do Ave (IPCA), 4750-810 Barcelos, Portugal*

[†] *Autor para correspondência: id9458@alunos.uminho.pt*

RESUMO

O setor da Construção Civil é um dos maiores contribuintes da atualidade para o aumento contínuo no consumo global dos plásticos. No entanto, apesar das propriedades dos plásticos se adequar a várias aplicações neste setor, a sua sustentabilidade é uma preocupação, principalmente porque as aplicações plásticas atuais são projetadas e fabricadas sem uma prudente reflexão sobre o seu ciclo de vida e a sua gestão em fim de vida. Este fator, impulsionado pelo crescimento global da população e aumento na procura por habitação, juntamente com um comportamento social irresponsável com a gestão dos resíduos de construção e demolição, resultou num agravamento da crise global de poluição ambiental. A maioria do plástico reciclado que entra atualmente no mercado europeu é aplicado na construção civil em aplicações não ecológicas, que simplesmente consomem recursos plásticos. É vital preservar e otimizar os recursos existentes, o que requer empregar conceitos e estratégias da economia circular e, para isso, é preciso medir a circularidade de um produto. Os indicadores de circularidade são muito interessantes nesta abordagem. No entanto, existe uma infinidade destas ferramentas na literatura, com características e metodologias incompatíveis. Este artigo fornece uma análise dos micro-indicadores de circularidade mais relevantes para o setor da Construção Civil, enquanto identifica diretrizes e boas práticas para promover a transição do setor para uma economia mais circular.

ABSTRACT

The civil construction sector has been a large contributor for the continuous global increase in the consumption of plastics. However, while the properties of plastics make them very suitable for several civil construction applications, their sustainability is a concern, mostly because current approaches for design and manufacturing do not properly consider their entire lifecycle and end-of-life management. The combined factors of a global population growth and increase demand for housing, together with a standard irresponsible societal behaviour with construction and demolition wastes, is worsening the global environmental pollution crisis. Much of the recycled plastic entering the European market is applied into civil construction applications, but most current usage is not environmentally friendly. It is vital to preserve and optimize existing resources, which requires employing circular economy concepts and strategies, and for that, one must be able to measure the circularity of a product. Circularity indicators are very interesting in this scope. However, a plethora of such tools exist in the literature, with mismatched features and scope. This paper provides an analysis of the circularity micro-indicators more relevant to the Building and Construction sector, while identifying guidelines and good practices to promote this application

Palavras-chave:

Economia Circular,
Avaliação da
Circularidade,
Micro-indicadores,
Construção Civil,
Plásticos

Keywords:

Circular Economy,
Circularity
Assessment,
CE Micro-indicators,
Civil Construction,
Plastics

sector transition to a more circular economy.

1. Introdução

O sector da construção civil é responsável por cerca de 9% do PIB europeu e por 18 milhões de postos de trabalho [1]. Do ponto de vista dos materiais, é um setor altamente intensivo no consumo de recursos e na geração de resíduos [2], sendo responsável por cerca de 39% da emissão de gases efeito de estufa na Europa [1]. Os impactos ambientais provocado por este sector na europa ronda os 50% do uso total de matérias-primas, 40% da energia final global consumida, 30% do consumo de água e 35% da geração de resíduos [2], [3].

Mais de 20% da produção total de plásticos na europa é encaminhada para aplicações na construção civil, tornando o setor da construção o segundo maior consumidor de plástico da europa [4], [5]. Os plásticos estão presentes em todas as peças de um edifício, como por exemplo, em tubagens, condutas, perfis de janelas, revestimentos de chão e paredes, tintas, colas, entre outros [4], [6], [7]. Häkkinen, Kuittinen, and Vares 2019, no seu estudo, concluiu que o consumo de plástico num edifício ronda no seu total entre as 23-51 toneladas durante o seu ciclo de vida, e 58-79% destes plásticos são colocados no edifício na sua fase de construção. No entanto, o seu peso é inferior a 1% quando comparado com o peso total do edifício [4].

Atualmente, a população mundial corresponde a 7,9 biliões de habitantes, esperando-se que em 2050 seja de aproximadamente 9,6 biliões de pessoas [8]. Um pouco mais de metade da população mundial (54%) vive em áreas urbanas, sendo estas áreas responsáveis por 75% do consumo de recursos do planeta e 60-80% das emissões GEE [8]. Assim sendo, com o aumento da população e a sua aglomeração nas áreas urbanas, estima-se uma extração de 180 biliões de toneladas de matérias-primas do planeta em 2050 (o equivalente a 3 planetas terra) e como consequência uma alta geração de resíduos para suprir as necessidades habitacionais da população [8].

Quando direcionamos a nossa atenção para os RCDs (Resíduos de Construção e Demolição), os plásticos estão posicionados na segunda maior fração de resíduos, juntamente com os metais e o cartão, sendo a primeira fração referente aos minerais [9], [10]. Enquanto resíduos de betão e aço são cada vez mais retidos no ciclo dos materiais, por meio da reciclagem, para os restantes RCDs o cenário é bem diferente. Embora os plásticos provenientes das fases de construção do edifício, sejam separados, reaproveitados e reciclados, os plásticos resultantes da fase de demolição continuam a ser incinerados ou no pior cenário, depositados em aterros [4], [11].

Outra questão importante é o aumento dos custos das matérias-primas que impulsionam a construção civil a utilizar materiais alternativos de forma mais eficiente, por exemplo, materiais reutilizados ou reciclados [1].

Mais de 45% dos plásticos reciclados que entram na economia europeia são aplicados na construção de novos edifícios e em obras públicas [5]. E apesar de Awoyera and Adesina afirmar que as introduções de resíduos plásticos reciclados em aplicações na construção civil poderão solucionar o problema da gestão de resíduos sólidos e a exaustão de matérias-primas plásticas para fins na construção civil [12], esta afirmação por vezes não corresponde à verdade. Algumas aplicações na construção, tais como a incorporação de material plástico reciclado em betão ou asfalto, por exemplo, aumenta o impacto ambiental no fim de vida deste produto, devido à dificuldade em separar estes materiais, levando-os para aterro ao invés de recuperar os seus recursos.

Neste contexto e como prevenção da rutura da capacidade de produção e extração de recursos do planeta ao ponto dos danos serem irreversíveis, existe uma urgente necessidade e pressão para que ocorra a transição do setor da construção civil para um paradigma mais sustentável [1], sendo a implementação de uma Economia Circular (EC) o caminho mais correto a seguir [8], [11].

Os próximos passos para mudar a atual abordagem econômica da indústria da Construção exige o fecho de ciclos, a reutilização de resíduos e recursos, bem como o desacelerar do ciclo do material, desenvolvendo produtos duráveis com vários ciclos de reutilização [1]. Redução,

reutilização e reciclagem são conceitos bem implementados em outros setores industriais, contudo a sua implementação na construção civil é recente e limitada à prevenção e gestão de resíduos, principalmente na reciclagem [1]. A reutilização de materiais e componentes é menos intensiva na produção de carbono e consumo de energia, quando comparada com a reciclagem, trazendo não apenas vantagens ambientais, mas também econômicas ao setor [11]. Assim sendo, a progressão da transição para uma EC pode ser aferida através de indicadores de circularidade [13], [14].

Alguns autores [15]–[17] desenvolveram revisões focadas na reunião de indicadores de circularidade, que confirmou a existência de mais de 100 microindicadores de circularidade na literatura para calcular a circularidade de um produto ou de uma empresa. No entanto, nem todos são relevantes para as aplicações plásticas no sector da construção civil.

Ao avaliar o trabalho de Kristensen e Mosgaard [16], concluiu-se que este é a tentativa de categorização mais extensa e rigorosa feita em indicadores de nível micro até à atualidade. Kristensen and Mosgaard, no seu Artigo [16], analisa estes micro indicadores de circularidade e identifica quais são predominantes na mensuração de cada categoria de foco da EC. Categorias estas que emergiram de uma análise exaustiva da literatura, resultando em 9 diferentes categorias de foco da EC, sendo elas: Reutilização, Eficiência de Recursos, Desmontagem, Extensão da Vida Útil, Gestão de Resíduos, Indicadores Multidimensionais, Gestão de Fim-de-vida, Remanufatura e Reciclagem.

Assim sendo, decidiu-se centralizar este trabalho em 28 dos 30 indicadores que foram considerados por Kristensen e Mosgaard [16], uma vez que continuam relevantes e apoiados na literatura científica (os outros 2 incluem uma ferramenta online e um modelo para o qual não se encontrou uma fonte adequada que os documentassem e apoiasse).

Neste artigo, pretende-se identificar quais os microindicadores de circularidade mais relevantes para avaliar a circularidade de aplicações plásticas para o setor da construção civil, tendo como ponto de partida a caracterização documentada em [16] e a avaliação individual da literatura e metodologia de cada indicador. Em seguida, pretende-se avaliar quais as direções e boas práticas que podem ser extraídas desses indicadores de circularidade para promover uma adoção mais efusiva da circularidade nas aplicações plásticas aplicadas na construção civil.

1.1. Plásticos no Setor da Construção Civil

Os plásticos trouxeram muitas propriedades vantajosas, que são essenciais para a construção de edifícios modernos, pois são um material leve em peso, durável em diferentes ambientes (boa resistência química e mecânica), com bom desempenho térmico e isolamento elétrico, resistente à humidade, e barato [4], [10]. Propriedades estas que levam ao setor da construção civil ser o segundo maior consumidor de plástico na Europa.

O PVC (policloreto de vinil) é o tipo de polímero mais usado na construção civil. Cerca de 69% da produção total de PVC é usada para aplicações de uso final de construção, sendo que 38% desta produção é usada para produzir tubagens (tubagens de drenagem, para aplicações de saneamento e ventilação, aplicações para águas superficiais e pluviais), e 20% é usado para produzir perfis de janelas. A produção remanescente é aplicada em chapas para pisos e telhados, tapumes, caleiros e condutas para cabos elétricos e telecomunicações, incluindo o revestimento e as calhas dos cabos [4].

Plásticos como EPS, XPS (Poliestireno expandido e extrudido, respetivamente), PU (poliuretano), e PIR (Poliisocianurato) são usados em aplicações plásticas para isolamento. O PE (polietileno) é usado em tubagens de drenagem, isolamentos elétricos, barreiras de humidade, e para impermeabilização de pisos, paredes e telhados. Para além disto, o PE está também presente nas embalagens que acondicionam os produtos e materiais da construção civil, e também em coberturas e lonas que protegem a construção e seus materiais da exposição às intempéries e à sujidade [4]. O PP (polipropileno) é aplicado na construção em produtos relacionados com o sistema HVAC (Heating, Ventilating and Air Conditioning), tubos de esgoto e drenos de piso. O ABS (Acrilonitrilo butadieno estireno), PC (policarbonato) e PET (Polietileno tereftalato) estão presentes nos eletrodomésticos e itens de iluminação presentes no edifício [4].

Ainda que em pequenas quantidades, também diferentes tipos de resinas estão presentes

em muitos produtos para a construção, tais como resinas fenólicas, epóxi, copolímeros fenol formaldeído-ureia, ureia-formaldeído, melamina-ureia formaldeído e acrílica. As aplicações de uso final mais comuns são lã de rocha e vidro, para manter as fibras unidas, em painéis de fibra de média densidade (MDFs), painéis de partículas, laminados, colas, vernizes, ceras, tintas e lacas [4]. Os resumos da aplicação de plásticos em produtos de uso final aplicados na construção estão presentes na Tabela 1.

A participação de plásticos é muito alta nas peças elétricas e nos componentes do sistema HVAC, em contraste com as peças estruturais, onde a participação de plásticos é mínima [4].

As principais aplicações de plásticos que geraram resíduos no setor de construção e demolição são revestimentos de pisos e paredes (PVC), tubagens, condutas, materiais isolantes (PU) e perfis (PVC). A percentagem de resíduos plásticos no total de RCDs (resíduos de construção e demolição) recolhidos corresponde a 1%. A atual taxa de reciclagem mecânica é baixa (< 20%), e a maioria dos plásticos presentes nos RCDs vão para incineração ou aterro, uma vez que o plástico aplicado em edifícios tem uma longa vida útil e uma localização subterrânea acumulando lixo e impurezas, que dificultam o processo de reciclagem [4].

Para além disto, os tipos de polímeros utilizados na construção contêm frequentemente elevado teor de cargas como talco e calcário (acima de 20-30%), que lhes confere uma boa resistência à radiação UV, impactos mecânicos e maior resistência à abrasão. Contudo, condicionam as propriedades dos plásticos reciclados através do processo de reciclagem de RCDs. Em 2018, 5 milhões de toneladas de resíduos plásticos foram reciclados na Europa, onde 4 milhões de toneladas voltaram a entrar na economia europeia para fabricar novos produtos. Cerca de 46% deste plástico reciclado é utilizado para a construção de novos edifícios e obras públicas, sendo este setor o maior consumidor de plástico reciclado na Europa [5].

Os plásticos reciclados são utilizados em diversas aplicações da construção civil, como base e sub-base de construção de estradas, componentes de asfalto, cargas em compósitos comêntícios e misturas asfálticas, substituição de madeira, painéis de portas, material isolante, paredes e tijolos [12].

Tabela 1 - Aplicação de plásticos em Produtos destinados à construção civil (Adaptado de [4]).

Aplicações da Construção Civil	Plástico	
Isolamento	Materiais de isolamento baseado em plásticos	EPS, XPS, PU, PIR e PUR
	Materiais de isolamento de base mineral (lã de rocha e lã de vidro)	Resina copolímero de ureia-formaldeído fenólico e fenol
Sistemas de Saneamento e Irrigação	Tubagens, tubagens de drenagem, aplicações de águas superficiais e pluviais e condutas	PVC-U, PVC-P, PE e PP
Sistemas elétricos e de Telecomunicações	Condutas e revestimento de cabos	PVC-U e PVC-P
Janelas	Perfis de janelas, vidro, persianas, e outros perfis	PVC-U
	Chapas para pisos e telhados, tapumes, caleiros	PVC-U
Coberturas, Pisos e Telhado	Impermeabilização e revestimentos de pisos, paredes e telhados	PE, Resinas de UF e MUF
Sistemas HVAC	MDFs, aglomerados, pisos e laminados	Ureia-formaldeído, Melamina-ureia formaldeído
	Condutas de ventilação e de AC	PP
Iluminação e Aplicativos Domésticos	-	ABS, PC e PET
Revestimentos	Colas, vernizes, ceras	Resina acrílica e epóxi
	Tintas e lacas	Copolímeros de Acrilato, Epóxi e PU

Embora essas aplicações sejam apelidadas de sustentáveis, circulares e ecologicamente corretas, nem todas o são. O uso desses plásticos reciclados em aplicações de construção pode criar um caminho para usar esses resíduos para aplicações de longo prazo em comparação com as

de curto prazo, como reciclagem em novos produtos plásticos que têm um curto período de tempo [12], mas ao unir os materiais plásticos a outros materiais, como betão, asfalto, madeira, entre outros, os processos de separação e reciclagem no seu fim de vida tornar-se-ão difíceis, promovendo a sua incineração ou deposição em aterro. Consequentemente, essas aplicações apenas atrasam o tratamento desses resíduos em 50-70 anos, pois não fizeram mais do que consumir recursos plásticos, que antes poderiam ser reciclados, recuperando o seu recurso.

Para aplicar materiais plásticos em qualquer aplicação para fins na construção civil, sejam eles virgens ou reciclados, é muito importante seguir os princípios e estratégias da economia circular, pensar no seu tratamento em fim de vida, e não incorporar materiais reciclados apenas para obter uma melhoria das propriedades de um outro produto existente ou mesmo para consumir um resíduo.

2. Materiais e métodos

Os micro indicadores podem ser uma ferramenta valiosa para as empresas quando usados como fator de decisão em aquisições, design, opções de fim de vida ou processos de *takeback*. No entanto, diferentemente do que geralmente é postulado pelos criadores dos indicadores, a maioria não é fácil de utilizar. E embora a categorização de Kristensen e Mosgaard tenha sido muito relevante, ela não ajuda a entender cada indicador ou suas principais características. Além disso, não ajuda investigadores ou empresas a decidir quais indicadores usar para uma determinada aplicação.

Assim sendo, a partir da compilação e categorização dos microindicadores de circularidade documentada no artigo de Kristensen and Mosgaard [16], identificamos quais dos 28 micro-indicadores de circularidade são os mais relevantes para avaliar a circularidade de produtos plásticos aplicados na construção civil. A extensa lista de referências de fontes com as definições dos microindicadores pode ser encontrada na revisão acima mencionada [16], e foi revista e resumida por nós na Tabela 1 do Apêndice.

Para a realização deste estudo, reuniu-se um painel de investigadores multidisciplinar, com conhecimento na área da economia circular e avaliação da sustentabilidade de um produto, engenharia de polímeros e engenharia civil. Para além disso, realizaram-se inquéritos focados às indústrias transformadoras de produtos plásticos para aplicação na construção civil, onde se questionou as empresas quanto aos seus conhecimentos nos indicadores de circularidade e a sua importância em implementá-los no seio industrial.

Considerando as categorias de foco da EC e o ciclo de vida dos produtos plásticos típicos aplicados ao setor da construção (tubos, laminados de pavimentos e coberturas, materiais isolantes, outros), começou-se por identificar quais as categorias que tem ou não aplicação direta neste setor.

Após a identificação de cada uma das categorias foco relevantes para o ciclo de vida de uma típica aplicação plástica para a construção civil, analisou-se individualmente cada um dos indicadores contidos nessas categorias, tendo como critérios de seleção o seu alinhamento com o ciclo de vida e tratamentos em fim de vida típico de um edifício, facilidade de acesso aos dados necessários para o cálculo do indicador numa fase de desenvolvimento do produto e a facilidade em implementar o indicador em meio industrial, por ordem decrescente de importância. Para cada um dos indicadores rejeitados ou selecionados, a decisão foi devidamente argumentada através das características e metodologia de cálculo desse indicador.

Reunidos os micro-indicadores relevantes para o cálculo de produtos plásticos para aplicação na construção civil, foram identificadas as diretrizes que potenciam a circularidade nos indicadores relevantes para este sector industrial.

3. Resultados

Apenas 6 categorias têm aplicação direta no setor da construção civil, nomeadamente a Reciclagem, Remanufatura, Gestão em fim-de-vida, Gestão de Resíduos, Eficiência de Recursos, e Indicadores Multidimensionais.

Os Microindicadores de circularidade mais relevantes para aferir a circularidade das

aplicações plásticas da construção civil são Material Circularity Index (MCI)[27], Reuse potential indicator (RPI)[28], Value-based resource efficiency indicator (VRE)[29], Model expanded zero waste practice (EZWP)[30], Circularity Design Guidelines (CDG)[31] e Circular Economy Indicator Prototype (CEIP)[32]. Esses indicadores estão dentro das categorias de reciclagem, eficiência de recursos, gestão de resíduos e indicadores multidimensionais e são, na sua maioria, microindicadores ambientais ou econômicos. Além disso, o EZWP é tridimensional, pois envolve em sua metodologia de cálculo as três dimensões da sustentabilidade: social, ambiental e econômica[16].

Para além destes, existem outros indicadores que podem aferir a circularidade das aplicações plásticas da construção, contudo necessitam de uma avaliação prévia do produto a estudar, pois a informação necessária para o cálculo pode não estar disponível ou então não apresentarem correspondência com as etapas do ciclo de vida das comuns aplicações plásticas da construção. Estes microindicadores são o Recycling Desirability Index (RDI)[33], Material Reutilization Score (MRS)[34], Circular Economy index (CEI)[35], Combination Matrix (CM)[36], End-of-life Index (EOLI)[37], End-of-life Indices – Design Methodology (EOLI-DM)[38], Eco-cost and Value Creation (EVR)[39] e Typology for Quality Properties (TPQ)[40]. Como referido, antes da utilização destes microindicadores deve ser analisada a sua pertinência para o produto específico.

O MCI avalia o fluxo de materiais envolvidos, considerando a quantidade de material reciclável, biodegradável e compostável no produto, quantidade de resíduos irre recuperáveis e eficiência do processo de reciclagem, relacionando-os com a utilidade e vida útil do produto. Nesta abordagem, um produto que é produzido apenas com matéria-prima virgem, que acaba sendo depositado em aterro após o seu uso é considerado um produto totalmente linear, ou seja, $MCI=0$. No entanto, se um produto não contém nenhuma matéria-prima virgem e foi recolhido para reciclagem de seus componentes, onde a eficiência de reciclagem é de 100%, é considerado um produto totalmente circular, ou seja, $MCI=1$ [27].

O RPI é um indicador que avalia a semelhança do material de um produto a um recurso ou resíduo, após passar por um processo de tratamento de fim de vida. O RPI varia entre 0 e 1. Se $RPI=0$, significa que o material contém uma alta concentração de elementos poluentes cuja remoção será altamente dispendiosa ou ainda não estão disponíveis desenvolvimentos tecnológicos EOL capazes de proceder à separação dos materiais, sendo por esta razão mais semelhante a um resíduo. Se $RPI=1$ o material pode ser recuperado pelas tecnologias de fim-de-vida existentes, sendo semelhante a um recurso[28].

O VRE considera o valor das entradas não sustentáveis para a economia em relação ao produto, como energia, matérias-primas, mão de obra, componentes semiacabados, entre outros. Para um VRE ideal, o produto utilizou recursos de fontes sustentáveis, como energia renovável, componentes reutilizados ou materiais reciclados, gerando emprego e alto valor agregado. Este indicador é ideal para avaliar se o setor da construção utiliza de forma sustentável os recursos plásticos[29].

O EZWP é um modelo que fornece indicadores potenciais para a monitorização do compromisso dos funcionários na resolução de práticas de desperdício zero. Este indicador inclui medidas específicas de impacto social e econômico e fornece diretrizes para as empresas avaliarem a responsabilidade social de seus colaboradores em relação à hierarquia de redução de resíduos e medir o impacto das estratégias de negócios circulares[30].

O nível de melhoria da circularidade para cada grupo de diretrizes é definido como o produto do grau de IM e do grau de relevância. Portanto, o nível de melhoria de circularidade calculado para um produto varia de 1 a 9 para cada grupo de diretrizes, que é posteriormente representado graficamente por um gráfico radar [31].

O CEIP é uma ferramenta holística, assim como o CDG, para avaliar o desempenho do produto em relação aos princípios da economia circular, por meio de um conjunto de 15 questões divididas em cinco etapas do ciclo de vida do produto, onde cada uma dessas questões recebe uma pontuação. Os resultados são apresentados de acordo com a soma das correspondências das pontuações das respostas positivas às questões anteriores, que indicam o limite de desempenho da circularidade do produto em estudo, sendo o limite máximo correspondente a 152 pontos[32].

4. Discussão

Para promover a implementação da EC no setor da construção em termos de aplicações de plástico, todas as fases da vida do imóvel devem ser repensadas. A maioria das decisões deve ser tomada na fase de desenvolvimento e design do produto, onde o designer deve escolher materiais plásticos seguros, não tóxicos e não escassos (promovendo sempre que possível o uso de materiais reciclados), verificar a necessidade de envolver mais de um tipo de material e avaliar a viabilidade de recuperação desse material por meio de tecnologias de gestão de resíduos existentes.

No entanto, a utilização de material plástico reciclado misturado com outros materiais de construção (concreto ou argamassa, fibras sintéticas ou naturais), atuando apenas como carga ou matriz, não pode ser considerada uma solução circular ou sustentável, pois, no fim de vida da construção ou do edifício, os plásticos envolvidos não possuem alternativas para uma gestão sustentável dos seus resíduos - devido à dificuldade de separar os materiais plásticos destes materiais orgânicos e minerais - acabando por ser encaminhados para incineração ou no pior cenário para aterro. Este ato apenas impede a recuperação do plástico que outrora poderia ter sido recuperado, limitando a sua circularidade e a possibilidade de continuar a gerar valor económico, promovendo a procura contínua por material plástico virgem.

Além disso, decisões como tipos de ligação e métodos construtivos empregados devem garantir que os resíduos e componentes sejam adequadamente geridos no seu fim de vida, assim como o local da obra, que deve ter espaço suficiente para possibilitar a desconstrução, para recuperar o máximo possível de componentes sem danos.

Outra fase do ciclo de vida de uma construção que merece atenção dos construtores é a gestão dos resíduos, sejam eles decorrentes da construção ou demolição do edifício. O atual sistema de gestão de RCDs deve ser reconfigurado para um sistema onde pensamentos como a redução, reutilização e reciclagem são altamente incutidos para todos os resíduos gerados, colocando a incineração ou o aterro como direções alternativas insustentáveis. A colaboração e coordenação entre arquitetos, engenheiros e comerciantes também são fundamentais para fechar o ciclo de materiais e proporcionar harmonia e sustentabilidade no setor da construção civil.

5. Conclusão

Entre o vasto leque de microindicadores de circularidade que podem ser encontrados na literatura, 15 podem ser considerados relevantes para os produtos plásticos com aplicação no setor da construção. No entanto, se considerarmos um contexto industrial prático, nem todos esses indicadores são viáveis de calcular. A complexidade nos cálculos, a dificuldade em reunir os dados ao longo do ciclo de vida do produto, que geralmente não são registados pela empresa ou dependem de fontes externas (cuja confiança pode não ser garantida), e a falta de documentação suficientemente detalhada sobre quais indicadores se deve calcular, são alguns dos principais aspetos que as empresa transformadoras de produtos plásticos identificaram como obstáculo.

Estamos certos de que o set de microindicadores de circularidade selecionados e identificados neste artigo como relevantes para a construção, irá solucionar algum dos obstáculos identificados no paragrafo anterior, e simultaneamente auxiliar nas decisões a serem tomadas ao longo do processo de seleção de materiais, processos construtivos, soluções de montagem, e elementos construtivos, sejam as aplicações com materiais plásticos ou outros, apoiando o setor da construção na transição para uma economia circular e na construção de estruturas mais circulares.

No entanto, temos a noção que somente se conseguirá uma transição total e irreversível para uma EC se alguma coisa mudar a nível legislativo. Por exemplo, a criação de incentivos para construtores que utilizam materiais reciclados ou reutilizam resíduos ou que separam os resíduos no local da obra ou demolição.

Agradecimentos

Apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) ao IPC pelos projetos UIDB/05256/2020 e UIDP/05256/2020, e a bolsa de Doutoramento UI/BD/150827/2021 (JM).

Referências

- [1] M. Norouzi, M. Chàfer, L. F. Cabeza, L. Jiménez, D. Boer, Circular economy in the building and construction sector: A scientific evolution analysis, *J. Build. Eng.*, 44 (2021).
- [2] A. González, C. Sendra, A. Herena, M. Rosquillas, D. Vaz, Methodology to assess the circularity in building construction and refurbishment activities, *Resour. Conserv. Recycl. Adv.*, 12 (2021) 200051.
- [3] Ö. Çimen, Construction and built environment in circular economy: A comprehensive literature review, *J. Clean. Prod.*, 305 (2021).
- [4] T. Häkkinen, M. Kuittinen, S. Vares, *Plastics in buildings*, 2019.
- [5] PlasticEurope, *Plastics – the Facts 2020*, 2020.
- [6] S. Mudgal et al., *Plastic Waste in the Environment - Final Report.*, 2011.
- [7] M. Sadat-Shojai, G. R. Bakhshandeh, Recycling of PVC wastes,” *Polym. Degrad. Stab.*, 96 (2011) 404–415.
- [8] B. Konstantinovas, N. V. Bento, T. Sanches, *Economia Circular No Setor Da Construção Civil I- Ciclo dos Materiais*, 2019.
- [9] D. Briassoulis, M. Hiskakis, E. Babou, Technical specifications for mechanical recycling of agricultural plastic waste, *Waste Manag.*, 33 (2013) 1516–1530.
- [10] M. Liikanen et al., Construction and demolition waste as a raw material for wood polymer composites – Assessment of environmental impacts, *J. Clean. Prod.*, 225 (2019) 716–727.
- [11] T. O’Grady, R. Minunno, H. Y. Chong, G. M. Morrison, Design for disassembly, deconstruction and resilience: A circular economy index for the built environment, *Resour. Conserv. Recycl.*, 175 (2021) 105847.
- [12] P. O. Awoyera, A. Adesina, Plastic wastes to construction products: Status, limitations and future perspective, *Case Stud. Constr. Mater.*, 12 (2020) 003300.
- [13] G. Lonca, P. Lesage, G. Majeau-Bettez, S. Bernard, M. Margni, Assessing scaling effects of circular economy strategies: A case study on plastic bottle closed-loop recycling in the USA PET market, *Resour. Conserv. Recycl.*, 162 (2020) 105013.
- [14] M. Saidani, B. Yannou, Y. Leroy, F. Cluzel, A. Kendall, A taxonomy of circular economy indicators, *J. Clean. Prod.*, 207 (2019) 542–559.
- [15] B. Corona, L. Shen, D. Reike, J. Rosales Carreón, E. Worrell, Towards sustainable development through the circular economy—A review and critical assessment on current circularity metrics, *Resour. Conserv. Recycl.*, 151 (2019) 104498.
- [16] H. S. Kristensen, M. A. Mosgaard, A review of micro level indicators for a circular economy – moving away from the three dimensions of sustainability?, *J. Clean. Prod.*, 243 (2020) 118531.
- [17] M. Saidani, B. Yannou, Y. Leroy, F. Cluzel, A. Kendall, A taxonomy of circular economy indicators, *J. Clean. Prod.*, 207 (2019) 542–559.
- [18] J. Mesa, I. Esparragoza, H. Maury, Developing a set of sustainability indicators for product families based on the circular economy model, *J. Clean. Prod.*, 196 (2018) 1429–1442.
- [19] Y. A. Alamerew, D. Brissaud, Evaluation of Remanufacturing for Product Recovery : Multi-criteria Decision Tool for End-of-Life Selection Strategy, In 3rd International Conference on Remanufacturing, 2017.
- [20] L. Cong, F. Zhao, J. W. Sutherland, Product Redesign for Improved Value Recovery via Disassembly Bottleneck Identification and Removal, *Procedia CIRP*, 61 (2017) 81–86.
- [21] P. Van Loon, L. N. Van Wassenhove, Assessing the economic and environmental impact of remanufacturing: a decision support tool for OEM suppliers, *Int. J. Prod. Res.*, 56 (2018) 1662–1674.
- [22] M. Linder, S. Sarasini, P. van Loon, A Metric for Quantifying Product-Level Circularity, *J. Ind. Ecol.*, 21 (2017) 545–558.
- [23] P. Zwolinski, M. A. Lopez-Ontiveros, D. Brissaud, Integrated design of remanufacturable products based on product profiles, *J. Clean. Prod.*, 14 (2006) 1333–1345.
- [24] IDEAL & CO Explore, “Circularity Calculator,” 2021. Available: <http://www.circularitycalculator.com/>. [Accessed: 01-Feb-2021].
- [25] A. Van Schaik, M. A. Reuter, Recycling indices visualizing the performance of the circular

- economy, *World Metall.* - ERZMETALL, 69 (2016) 201–216.
- [26] M. Ameli, S. Mansour, A. Ahmadi-javid, Resources , Conservation & Recycling A simulation-optimization model for sustainable product design and efficient end-of-life management based on individual producer responsibility, *Resour. Conserv. Recycl.*, 140 (2019) 246–258.
- [27] Ellen MacArthur Foudation and ANSYS Granta, *Circularity Indicators - An Approach to Measuring Circularity - Methodolofy*, (2019) 1–64.
- [28] J. Y. Park, M. R. Chertow, Establishing and testing the ‘reuse potential’ indicator for managing wastes as resources, *J. Environ. Manage.*, 137 (2014) 45–53.
- [29] F. Di Maio, P. Carlo, K. Baldé, M. Polder, Resources , Conservation and Recycling Measuring resource efficiency and circular economy : A market value approach, *Resources, Conserv. Recycl.*, 122 (2017) 163–171.
- [30] V. Veleva, G. Bodkin, S. Todorova, The need for better measurement and employee engagement to advance a circular economy: Lessons from Biogen’s ‘zero waste’ journey, *J. Clean. Prod.*, 154 (2017) 517–529.
- [31] M. D. Bovea, V. Pérez-Belis, Identifying design guidelines to meet the circular economy principles: A case study on electric and electronic equipment, *J. Environ. Manage.*, 228 (2018) 483–494.
- [32] S. Cayzer, P. Griffiths, V. Beghetto, Design of indicators for measuring product performance in the circular economy, *Int. J. Sustain. Eng.*, 10 (2017) 289–298.
- [33] A. A. Mohamed Sultan, E. Lou, P. Tarisai Mativenga, What should be recycled: An integrated model for product recycling desirability, *J. Clean. Prod.*, 154 (2017) 51–60.
- [34] CradletoCradle, Version 3.1 cradle to cradle certified product standard, 2016.
- [35] F. Di Maio, P. C. Rem, A Robust Indicator for Promoting Circular Economy through Recycling, *J. Environ. Prot. (Irvine,. Calif.)*, 6 (2015) 1095–1104.
- [36] F. Figge, A. S. Thorpe, P. Givry, L. Canning, E. Franklin-Johnson, Longevity and Circularity as Indicators of Eco-Efficient Resource Use in the Circular Economy, *Ecol. Econ.*, 150 (2018) 297–306.
- [37] K. Y. Lee, Y. Aitomäki, L. A. Berglund, K. Oksman, A. Bismarck, On the use of nanocellulose as reinforcement in polymer matrix composites, *Compos. Sci. Technol.*, 105 (2014) 15–27.
- [38] C. Favi, M. Germani, A. Luzi, M. Mandolini, A design for EoL approach and metrics to favour closed-loop scenarios for products A design for EoL approach and metrics to favour closed-loop scenarios for products, *Int. J. Sustain. Eng.*, 7038 (2017).
- [39] J. Vogtlander, A. Mestre, A. Scheepens, R. Wever, *Eco-efficient value creation, sustainable design and business strategies*, 2nd ed. Delft Academic Press / VSSD, 2014.
- [40] E. Lacovidou, A. P. M. Velenturf, P. Purnell, Science of the Total Environment Quality of resources : A typology for supporting transitions towards resource ef fi ciency using the single-use plastic bottle as an example, *Sci. Total Environ.*, 647 (2019) 441–448.
- [41] P. Vanegas et al., Ease of disassembly of products to support circular economy strategies, *Resour. Conserv. Recycl.*, 135 (2018) 323–334.
- [42] M. Mandolini, C. Favi, M. Germani, M. Marconi, Time-based disassembly method : how to assess the best disassembly sequence and time of target components in complex products, (2018) 409–430.
- [43] E. Franklin-Johnson, F. Figge, L. Canning, Resource duration as a managerial indicator for Circular Economy performance, *J. Clean. Prod.*, 133 (2016) 589–598.
- [44] S. K. Das, P. Yedlarajiah, R. Narendra, An approach for estimating the end-of-life product disassembly effort and cost, *Int. J. Prod. Res.*, 38 (2000) 657–673.

Apêndice

Tabela 1 - Sumário dos indicadores presentes no estudo (adaptado de [16]).

Nome	Descrição	Princípio	Autor
RDI	Recycling Desirability Index	Quão desejável é a reciclagem.	[33]
RPI	Reuse Potential Indicator	Quão semelhante um material recuperado é a um recurso ou resíduo.	[28]
CEI	Circular Economy Index	Valor econômico dos materiais de produtos em fim de vida.	[35]
MCI	Material Circularity Indicator	Grau de circularidade de um produto com base no fluxo de seus materiais.	[27]
MRS	Material Reutilization Score	Pontue o produto de acordo com sua fração de material reciclável.	[34]
EVR	Eco-cost /value Creation	Eficiência de recursos pela relação entre eco custos e o valor de um produto.	[39]
VRE	Value-Based Resource Efficiency	Eficiência de recursos baseada na massa e alinhada com as políticas ambientais/sociais/econômicas.	[29]
EDIM	Ease of Disassembly Metric	Tempo de desmontagem de um produto.	[41]
EDT	Effective Disassembly Time	Tempo efetivo para desmontar um produto para isolar um componente alvo.	[42]
LI	Longevity Indicator	Período em que um material é retido em um ciclo de produto.	[43]
PLCM	Product-level Circularity Metric	Com base no valor econômico de todas as peças como unidade básica e o produto é agregado em uma métrica circular.	[22]
CC	Circularity Calculator	Conteúdo reciclado de um produto.	[24]
EPVR	End-of-use product value recovery	Método com diferentes opções para gerenciar produtos em fim de uso.	[20]
SDEO	Sustainable design and end-of-life options	Desempenho de design sustentável de uma família de produtos em fim de uso.	[26]
PR-MCDT	Product Recovery Multi-criteria Decision Tool	Viabilidade de selecionar a remanufatura como opção para recuperar um produto em fim de uso.	[19]
REPRO2	Remanufacturing Product Profiles	Ferramenta que auxilia no design de produtos remanufaturados, com base em propostas de eco design.	[23]
TPQ	Typology for Quality Properties	Ferramenta de triagem da qualidade dos materiais/componentes de um produto, para melhorar a eficiência dos recursos	[40]
EZWP	Model of Expanded Zero Waste Practice	Ponto de partida para as empresas desenvolverem indicadores de gestão de resíduos (numa abordagem de desperdício zero).	[30]
CDG	Circularity Design Guidelines	Diretrizes de design para melhorar o design de produtos de uma perspectiva de economia circular.	[31]
DSTR	Decision Support Tool for Remanufacturing	Avalia se a remanufatura é um processo economicamente e ambientalmente viável.	[21]
RI	Recycling Indices	Define a taxa de reciclagem e recuperação de um produto e atribui uma categoria de eficiência à reciclagem.	[25]
SICE	Sustainability indicators in EC	Conjunto de 5 indicadores baseados na sustentabilidade e desempenho funcional de um produto.	[18]
CM	Combination Matrix	Contribui para o uso circular de recursos na empresa.	[36]
EOLI	End-of-life Index	Custos totais de cada processo de gerenciamento de produtos em fim de vida.	[37]

EOLI-DM	End-of-life Indices (Design Methodology)	Custos totais de cada processo de gestão de produtos em fim de vida com base em metodologias de eco design.	[38]
EEVC	Eco-efficient Value Creation	Baseado no EVR em um modelo para avaliar o potencial de remanufatura.	[39]
DEI	Disassembly Effort Index	Trabalho e processos necessários para desmontar um produto para fornecer uma pontuação para o produto.	[44]
CEIP	Circular Economy Indicator Prototype	Ferramenta que avalia o desempenho do produto no contexto da economia circular.	[32]

Medição Contínua do Teor de Humidade em Materiais de Construção Consolidados com a Técnica Time-Domain Reflectometry

Continuous Measurement of Moisture Content in Consolidated Building Materials with the Time-Domain Reflectometry Technique

T.S. Freitas^{a†}, A.S. Guimarães^a, S. Roels^b, V.P. de Freitas^a, A. Cataldo^c

^a *CONSTRUCT - LFC, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal*

^b *Building Physics and Sustainable Design, Department of Civil Engineering, KU Leuven, Belgium*

^c *Department of Innovation Engineering, University of Salento, Italy*

[†] *Autor para correspondência: tsf@fe.up.pt*

RESUMO

A medição do teor de humidade em materiais de construção é fundamental tanto ao nível da prática profissional como ao nível da investigação. Contudo, apesar da grande variedade de técnicas disponíveis para determinar o teor de humidade em materiais de construção, efetuar medições em profundidade, in situ e de forma pouco invasiva ao longo do tempo é ainda um grande desafio. A técnica Time-Domain Reflectometry (TDR) é vulgarmente utilizada para medições do teor de humidade do solo, mas a sua aplicação em materiais de construção é ainda considerada um método inovador e pouco explorado, especialmente no que diz respeito à sua implementação em materiais de baixa porosidade. Os principais obstáculos à corrente utilização da técnica em materiais de construção consolidados são: (1) a dificuldade de garantir um bom contacto entre o sensor TDR e o material; (2) a falta de expressões de calibração adequadas entre a permissividade e o teor de humidade para materiais de construção; (3) a ausência de procedimentos padronizados para obter curvas de calibração adequadas; e (4) a necessidade de desenvolver ferramentas automáticas capazes de processar os dados e fornecer a evolução do teor de humidade ao longo do tempo. Nesta comunicação, apresenta-se uma metodologia capaz de ultrapassar os referidos obstáculos e proporcionar medições bem-sucedidas do teor de humidade com o método TDR. Os resultados obtidos em amostras de pedra calcária e tijolo sólido demonstram que a técnica TDR é uma solução adequada para monitorizar o teor de humidade em materiais de construção, encorajando novos desenvolvimentos que potenciem uma utilização mais generalizada da técnica.

ABSTRACT

Measuring moisture content in construction materials is extremely important both for professional practice as well as for research. However, despite the wide variety of techniques available for moisture content determination, performing in-depth, in-situ and long-term minor destructive measurements is still a great challenge. The Time-Domain Reflectometry (TDR) technique is commonly used for soil moisture measurements, but its application in construction materials is considered a relatively new method, especially for low-porosity building materials. The major challenges to its current use in hard construction materials are: (1) the difficulty of ensuring good contact between the TDR probe and the material; (2) the lack of appropriate calibration functions between the measured relative permittivity and

Palavras-chave:

TDR; Teor de Humidade; Monitorização; Materiais de construção; Pedra calcária; Tijolo.

Keywords:

TDR; Moisture Content; Monitoring; Building materials; Limestone; Brick.

the moisture content for building materials; (3) the absence of standardized procedures to obtain appropriate calibration curves for construction materials; and (4) the need to develop automatic tools capable of processing the data and providing the evolution of moisture content over time. This paper presents a methodology to overcome these obstacles in order to obtain successful moisture content measurements with the TDR technique. The proposed procedure was applied and tested on limestone and solid brick samples. The results obtained show that TDR is a suitable solution for monitoring moisture content on low-porosity building materials, encouraging further developments that may lead to a more widespread use of the technique.

1. Introdução

A presença de humidade nos edifícios é um problema comum, recorrente e com consequências sérias para a sua preservação. Por esses motivos, a capacidade de medir o teor de humidade em materiais de construção é extremamente importante, quer para assegurar um correto diagnóstico das patologias associadas à humidade, quer para permitir a adoção de medidas de intervenção adequadas e a avaliação da sua eficácia ao longo do tempo. Contudo, apesar da reconhecida importância deste tema e da grande variedade de técnicas disponíveis para determinar o teor de humidade em materiais de construção, efetuar medições em profundidade, in situ e de forma pouco invasiva ao longo do tempo é ainda um grande desafio. De facto, a maior parte dos métodos correntemente adotados requerem a recolha de amostras de material, o que impede a realização de medições sucessivas e contínuas do teor de humidade no mesmo local. Outra alternativa muito frequente tem por base a realização de análises assentes em medições superficiais do teor de humidade. Neste caso, apesar dos elementos construtivos serem totalmente preservados, é apenas possível obter uma informação parcial do seu teor de humidade, já que as privilegiadas condições de evaporação perto da superfície distorcem, muitas vezes, o verdadeiro estado do seu interior. Para além disso, o equipamento exigido por algumas técnicas de medição do teor de humidade, como o envolvido no método baseado na atenuação de raios γ ou no método de ressonância magnética (NMR), tornam estas soluções mais adequadas para medições em laboratório, dificultando, ou até mesmo impedindo, aplicações in situ [1]. Por todos estes motivos, na prática corrente e também na investigação, abordagens mais pragmáticas e que permitem medir indiretamente o teor de humidade acabam por ser adotadas. Um exemplo, ainda muito popular, passa pela utilização de sensores de humidade relativa, mesmo tendo em conta a sua maior incerteza e desadequação quando se pretende monitorizar valores do teor de humidade no domínio capilar [2]. É, portanto, claro que efetuar medições precisas do teor de humidade em materiais de construção é um assunto complexo e que até ao momento continua a ser objeto de investigação. Neste trabalho, a técnica Time-Domain Reflectometry (TDR) é explorada como uma solução para monitorizar de forma contínua, em profundidade e de modo pouco invasivo o teor de humidade em materiais de construção. O carácter inovador da técnica para este propósito, as dificuldades existentes e a falta de procedimentos padronizados impulsionaram o desenvolvimento de uma metodologia capaz de proporcionar medições bem-sucedidas do teor de humidade com o método TDR. A metodologia proposta foi testada em amostras de pedra calcária e tijolo sólido, tendo os resultados obtidos mostrado que a técnica é adequada para monitorizar o teor de humidade em materiais de construção consolidados.

2. A técnica Time-Domain Reflectometry (TDR)

A história da utilização da técnica TDR no domínio da engenharia e das ciências naturais é longa e conta com inúmeras aplicações que se estendem por diferentes campos. De facto, é um método comprovadamente aceite e reconhecido para medir o teor de humidade dos solos [3], para o controlo de qualidade de produtos alimentares [4], na localização de fugas em tubos subterrâneos [5] e na determinação das propriedades dielétricas de líquidos e materiais granulares [4]. Contudo, apesar do profundo conhecimento da técnica TDR como tecnologia de medição, a sua utilização na determinação do teor de humidade em materiais de construção é ainda considerada inovadora,

principalmente no que diz respeito à sua implementação em materiais consolidados e pouco porosos. Em materiais de construção granulares ou de elevada porosidade, como é o caso do betão celular [6], do silicato de cálcio [7], de diferentes tipos de cimentos e argamassas [8] e de algumas variedades de tijolos [9], a técnica TDR já mostrou ser capaz de detetar variações do teor de humidade em ensaios laboratoriais de absorção de água por capilaridade. Apesar dos trabalhos já desenvolvidos, efetuar medições quantitativas e em profundidade do teor de humidade com a técnica TDR é ainda um desafio com poucas respostas e soluções. Os principais entraves a uma utilização mais generalizada da técnica em materiais de construção podem ser resumidos em duas categorias:

- Falta de sensores adequados e dificuldades no processo de instalação: a necessidade de garantir um bom contacto (sem espaços de ar) entre os sensores TDR e o material a monitorizar é fundamental para conseguir medições precisas com a técnica. Contudo, a maioria dos sensores TDR disponíveis no mercado, como o LP/MS [10], o FP/mts [11] ou o CS616 [12], foram desenvolvidos para medições do teor de humidade dos solos e, conseqüentemente, possuem hastes muito finas e longas que dificultam ou inviabilizam a sua instalação em materiais de construção rígidos. Por outro lado, os sensores TDR superficiais, elaborados especificamente para aplicações não invasivas em materiais de construção [13], só permitem medições nas camadas superficiais dos elementos. Assim, para medir o teor de humidade em profundidade, torna-se necessário utilizar sensores, semelhantes aos dos solos, mas com hastes de maior diâmetro e mais robustas que permitam a instalação em materiais de construção consolidados (Figura 1). Alguns autores já exploraram estes sensores protótipo nos seus trabalhos [8], mas, mesmo nestes casos, o desejado contacto perfeito entre o sensor e o material continua a ser um objetivo difícil de alcançar.

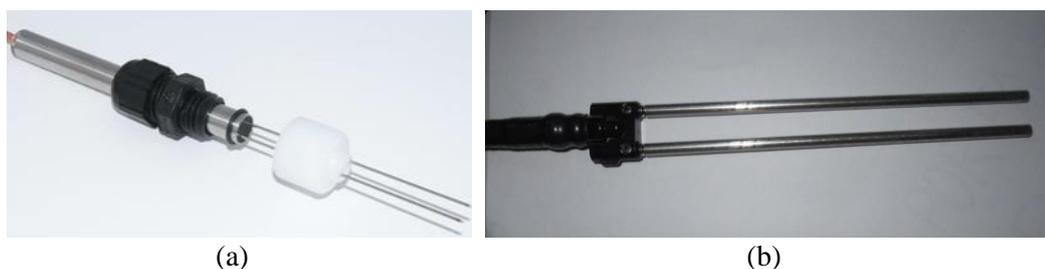


Figura 1 – Diferença entre sensores TDR: (a) sensor TDR comercial desenvolvido para medição do teor de humidade dos solos [10]; (b) sensor TDR, especialmente desenvolvido no âmbito deste trabalho, para aplicação em materiais de construção consolidados.

- Inexistência de curvas de calibração apropriadas e ausência de procedimentos padronizados para as obter: a avaliação quantitativa do teor de humidade com a técnica TDR exige a utilização de curvas de calibração que permitam converter a permissividade dielétrica relativa, ϵ_{app} , diretamente fornecida pela técnica, no teor de humidade, w , do material em estudo, isto é, $w(\epsilon_{app})$. De uma forma geral, existem três abordagens para efetuar essa conversão. Uma primeira possibilidade passa pela utilização de funções empíricas de conversão desenvolvidas para os solos, como a de *Topp* (equação 1) e *Malicki* (equação 2) propostas, respetivamente, em 1980 [14] e 1996 [15]:

$$w = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} \epsilon_{app} - 5.5 \times 10^{-4} \epsilon_{app}^2 + 4.3 \times 10^{-6} \epsilon_{app}^3 \quad (1)$$

$$w = \frac{\sqrt{\epsilon_{app}} - 0.819 - 0.168\rho - 0.159\rho^2}{7.18 + 1.18\rho} \quad (2)$$

onde w representa o teor de humidade do material poroso (m^3/m^3) e ρ a massa volúmica do material seco (kg/m^3). A fácil aplicação das funções de conversão desenvolvidas para os solos faz

com que continuem a ser frequentemente empregues para medir o teor de humidade em materiais de construção, apesar de alguns autores já terem demonstrado a sua desadequação [16, 17].

Uma segunda possibilidade envolve a utilização de funções semi-empíricas de conversão baseadas em modelos mistos dielétricos. A aplicação destes modelos requer o conhecimento da permissividade dielétrica relativa de cada constituinte que compõem os materiais, tipicamente fase sólida, líquida (água) e gasosa (ar), assim como o conhecimento de outros parâmetros, que não podem ser medidos diretamente, mas têm de ser determinados por calibração empírica do modelo. Existem algumas equações disponíveis capazes de descrever a permissividade dielétrica relativa de todo o material a partir da permissividade dos seus constituintes. Os modelos trifásicos são uma das opções mais amplamente adotadas, sendo o proposto por Roth et al [18] um dos exemplos mais consensuais (equação 3):

$$w = \frac{\varepsilon_{eff}^{\alpha} - \varepsilon_s^{\alpha} + \psi(\varepsilon_s^{\alpha} - \varepsilon_a^{\alpha})}{\varepsilon_w^{\alpha} - \varepsilon_a^{\alpha}} \quad (3)$$

onde ε_{eff} representa a permissividade dielétrica relativa de todo o material, ε_s a permissividade dielétrica da matriz sólida do material, ψ a porosidade aberta [m^3/m^3], ε_a a permissividade dielétrica relativa do ar ($\varepsilon_a \approx 1$), ε_w a permissividade dielétrica relativa da água ($\varepsilon_w \approx 78-82$, dependendo da temperatura da água), e α é um parâmetro empírico que tem de ser determinado por uma análise de regressão resultante da comparação entre os valores medidos da permissividade e os valores do teor de humidade conhecidos. Uma desvantagem da utilização destes modelos é que negligenciam a presença de humidade higroscópica o que, ao contrário do que acontece nos solos, pode comprometer a precisão das medições em materiais de construção. Por outro lado, as funções de conversão baseadas em modelos mistos dielétricos, apesar de promissoras, só foram exploradas e testadas numa pequena gama de materiais [19].

Uma terceira alternativa implica a determinação de uma curva de calibração específica para o material em estudo, através da comparação com um método de referência. O método gravimétrico é de longe o método de referência mais utilizado para obter a correlação entre a permissividade medida com a técnica TDR e o teor de humidade do material. Até ao momento, esta é a solução mais fiável, ainda que morosa para obter curvas de calibração apropriadas. Contudo, há ainda uma falta de clareza e consenso nos procedimentos envolvidos neste processo [20].

Na secção seguinte propõe-se uma forma para ultrapassar as dificuldades mencionadas, bem como se apresenta uma síntese dos procedimentos envolvidos para avaliar e quantificar o teor de humidade ao longo do tempo.

3. Metodologia de medição do teor de humidade com a técnica TDR

O princípio de funcionamento de qualquer medição TDR consiste no lançamento de um sinal eletromagnético e no conseqüente estudo da sua propagação ao longo de um sensor inserido no material em estudo. Os fundamentos teóricos necessários à interpretação do sinal, bem como todos os equipamentos exigidos ao funcionamento da técnica já foram detalhadamente descritos em [21]. Na Figura 2 encontra-se uma representação esquemática dos principais passos envolvidos até à obtenção do teor de humidade com a técnica TDR. O primeiro passo consiste em efetuar uma calibração individual de cada sensor utilizado, e tem como objetivo determinar o “comprimento elétrico do sensor”, d , quando este é colocado no ar, uma vez que essa distância pode ser ligeiramente diferente da medida com uma fita métrica. Esta primeira calibração envolve a realização de medições com os sensores TDR colocados em meios de permissividade dielétrica relativa conhecida e tão diferente quanto possível. Neste trabalho o ar ($\varepsilon_a \approx 1$) e a água destilada a 18 °C ($\varepsilon_w \approx 81$) foram os meios escolhidos para efetuar as medições. A calibração individual é portanto necessária para garantir medições precisas com a técnica, é independente do material em estudo e só precisa de ser realizada uma vez antes da utilização dos sensores. A forma detalhada de efetuar essa primeira calibração encontra-se pormenorizadamente apresentada em [22]. Numa segunda etapa torna-se necessário instalar os sensores TDR no material em estudo. Neste trabalho,

e para assegurar medições em profundidade, desenvolveram-se sensores especialmente adequados à utilização em materiais rígidos, sendo cada um constituído por duas hastes de 6 mm de diâmetro e 185 mm de comprimento. De modo a ultrapassar a dificuldade de garantir um bom contacto entre o sensor e o material, produziu-se uma peça de guia auxiliar metálica a qual permite efetuar furos com o paralelismo, dimensão e espaçamento necessários para que as hastes dos sensores sejam corretamente introduzidas sem a presença de espaços de ar que comprometam a precisão das medições (passo 2).

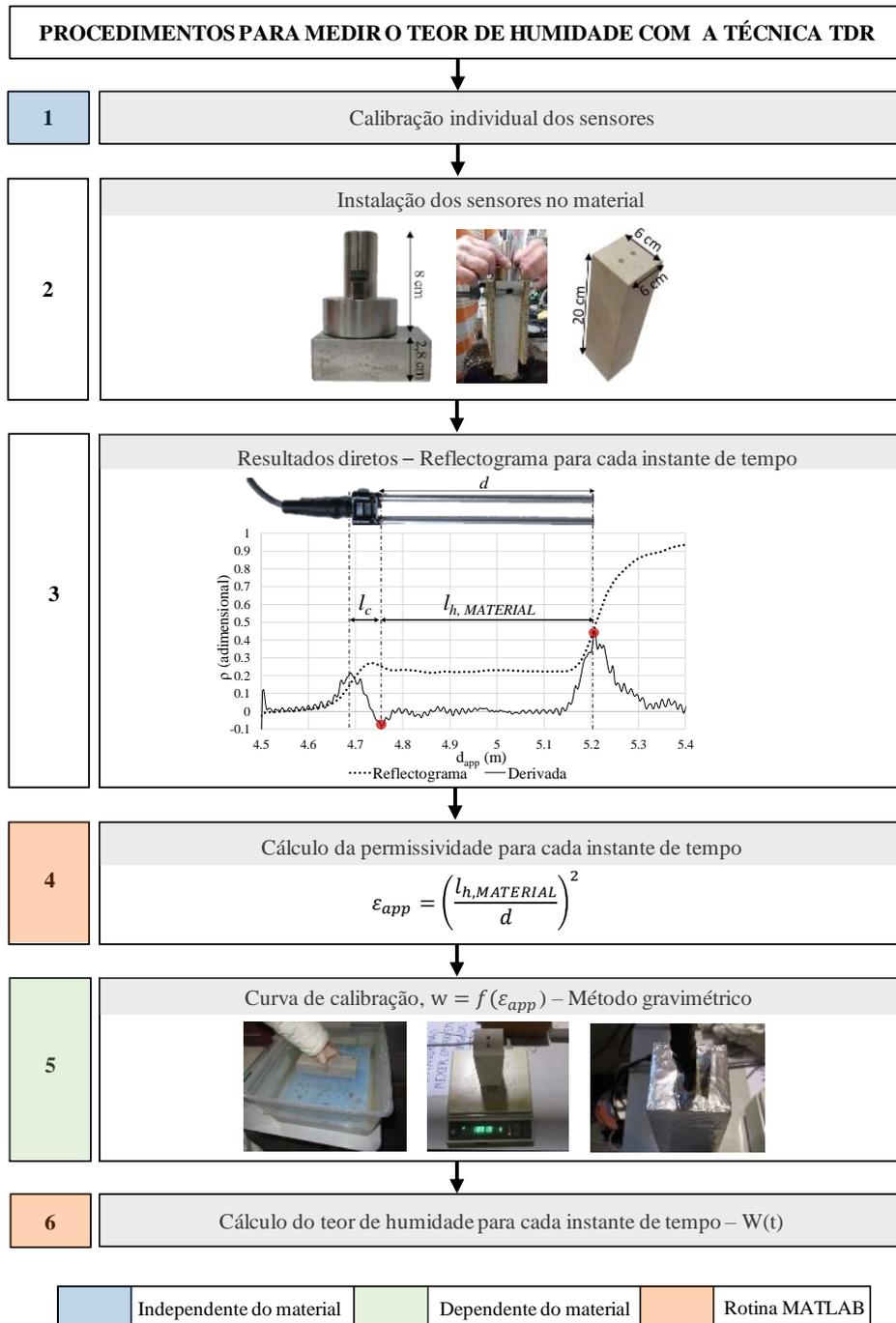


Figura 2 – Sequência de procedimentos adotados para medir o teor de humidade em materiais de construção porosos consolidados com a técnica TDR.

Após a instalação dos sensores é possível obter um conjunto de gráficos (reflectogramas) para os vários instantes de tempo em análise (passo 3). A interpretação destes resultados diretos

(descritos minuciosamente em [22]) permite, por meio da identificação de mínimos e máximos absolutos, calcular a permissividade dielétrica relativa do material ϵ_{app} (passo 4). Numa das finais e mais importantes fases deste processo é recomendável estabelecer uma curva de calibração para o material em estudo (passo 5). Neste trabalho o método gravimétrico foi utilizado como referência. Para isso, várias amostras de material foram imersas em água por diferentes períodos de tempo, seguindo-se de uma medição gravimétrica do seu teor de humidade, com a posterior impermeabilização total das amostras para garantir a redistribuição uniforme do teor de humidade e a validade das medições gravimétricas efetuadas. Uma vez estabelecida a curva de calibração do material, quantificar o seu teor de humidade ao longo do tempo ainda envolve a utilização de ferramentas automáticas (como o MATLAB) que permitam um tratamento célere e em tempo útil dos resultados (passo 6).

4. Resultados e discussão

A metodologia apresentada na Figura 2 é relativamente morosa, sobretudo devido à necessidade de obter uma curva de calibração específica para o material em estudo (passo 5), atendendo à desadequação das funções empíricas e semi-empíricas de conversão desenvolvidas para os solos e discutidas na secção 2. Ainda assim, o procedimento proposto pode ser dividido em duas partes, permitindo avaliar e monitorizar o teor de humidade de uma forma qualitativa ou quantitativa, em função das necessidades e propósitos do problema em estudo.

4.1. Avaliação qualitativa do teor de humidade

Para uma avaliação qualitativa do teor de humidade apenas os primeiros quatro passos da metodologia proposta na Figura 2 têm de ser seguidos. Na figura 3 apresentam-se os reflectogramas obtidos numa amostra de pedra calcária e tijolo sólido, para diferentes teores de humidade, após a aplicação dos passos mencionados. Os resultados mostram que, com os sensores TDR desenvolvidos e o procedimento de instalação proposto, foi possível detetar variações do teor de humidade nos dois materiais. Contudo, a diferença entre os reflectogramas medidos com a pedra calcária seca e saturada (Figura 3 a) é menor do que a diferença registada entre os reflectogramas determinados com o tijolo seco e saturado (Figura 3 b). Este resultado é reforçado pelos valores da permissividade dielétrica relativa medidos nos dois materiais (Tabela 1).

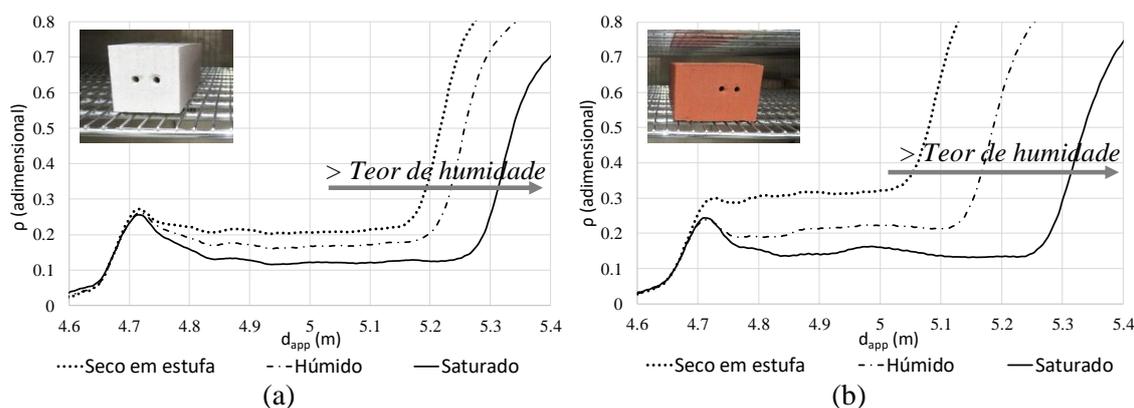


Figura 3 – Reflectogramas obtidos para diferentes teores de humidade com a técnica TDR em amostras de: (a) pedra calcária e (b) tijolo.

De facto, a gama de valores de permissividade recolhidos para a pedra calcária é menor do que para o tijolo sólido (isto é, $\Delta\epsilon_{app, pedra} = \epsilon_{app, sat} - \epsilon_{app, seco} = 2,6$ e $\Delta\epsilon_{app, tijolo} = \epsilon_{app, sat} - \epsilon_{app, seco} = 5,7$). Esta diferença deve-se sobretudo à baixa porosidade da pedra calcária face à do tijolo. Os resultados obtidos ajudam, assim, a compreender o motivo da maioria dos trabalhos encontrados na literatura se referirem à aplicação da técnica TDR em materiais de construção bastante porosos (como mencionado na secção 2). Adicionalmente, fundamentam a maior incerteza que existe, entre a comunidade científica, relativamente à utilização da técnica em materiais pouco porosos, por se

julgar que esta é menos sensível para detetar pequenas variações de teor de humidade nestes materiais. Apesar disso, os resultados apresentados na secção 4.2. mostram que a técnica é capaz de ultrapassar essa dificuldade.

Tabela 1 – Permissividade dielétrica relativa, ϵ_{app} , medida em amostras de pedra calcária e tijolo para diferentes teores de humidade.

	Pedra calcária	Tijolo sólido
	$\epsilon_{app}(-)$	$\epsilon_{app}(-)$
Seco em estufa	6,1	3,2
Húmido	7,4	5,4
Saturado	8,7	8,9

Este tipo de avaliações conseguem ser efetuadas sem um grande esforço de processamento do sinal, dispensam o moroso processo de calibração, mas apenas permitem efetuar uma análise qualitativa da evolução do teor de humidade. Contudo, para muitas aplicações práticas da engenharia civil a possibilidade de monitorizar variações relativas do teor de humidade ao longo do tempo é suficiente para detetar patologias ou avaliar a eficácia de determinadas soluções de tratamento.

4.2. Avaliação quantitativa do teor de humidade

A metodologia apresentada na Figura 2 foi aplicada integralmente a uma amostra de pedra calcária (20cm x 6cm x 6cm) para monitorizar (de forma quantitativa) a evolução do seu teor de humidade durante um ensaio de secagem à temperatura ambiente ($T_{média}=21,5^{\circ}\text{C}$ e $HR_{média}=53,8\%$). O ensaio começou com a amostra completamente saturada, tendo-se efetuado um registo contínuo de medições TDR até à sua secagem. Os resultados obtidos apresentam-se organizados na Figura 4 e Figura 5.

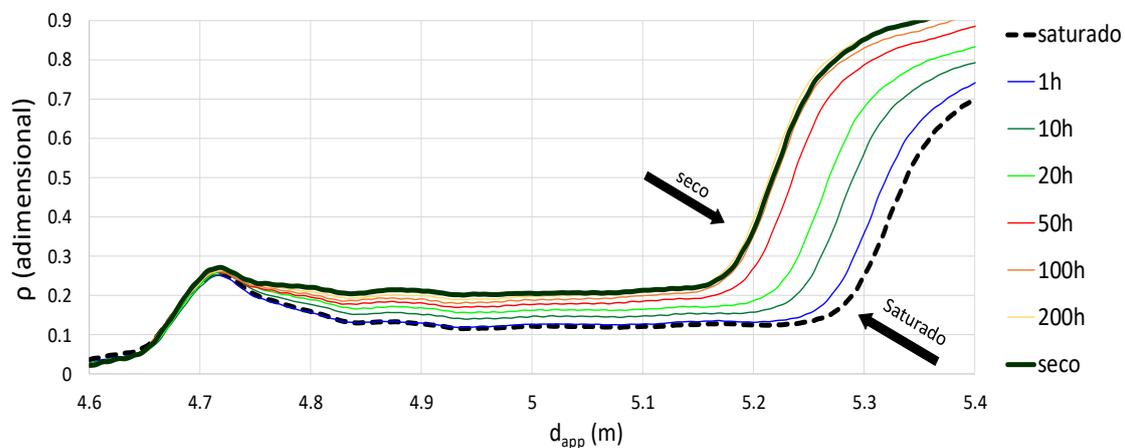


Figura 4 – Reflectogramas medidos durante o ensaio de secagem de uma amostra de pedra calcária.

Na Figura 4 é possível observar os reflectogramas registados para alguns instantes de tempo do ensaio (passo 3 da Figura 2). As medições refletem uma clara diferença entre os reflectogramas recolhidos quando a amostra estava completamente saturada e seca, bem como uma progressão gradual (a tender para o reflectograma característico do estado seco) durante o processo de secagem. Deste modo, o ensaio efetuado demonstrou que a técnica TDR é sensível para detetar pequenas variações do teor de humidade num material muito pouco poroso como é a pedra calcária em estudo (porosidade aproximadamente igual a 3%).

Na Figura 5 a) apresenta-se a evolução dos valores da permissividade dielétrica relativa, ϵ_{app} , calculados ao longo do ensaio. A permissividade é tanto maior quanto maior for o teor de

humidade do material em estudo. Após efetuar a calibração pelo método gravimétrico, foi possível converter os valores de ϵ_{app} no teor de humidade da pedra calcária (Figura 5 b).

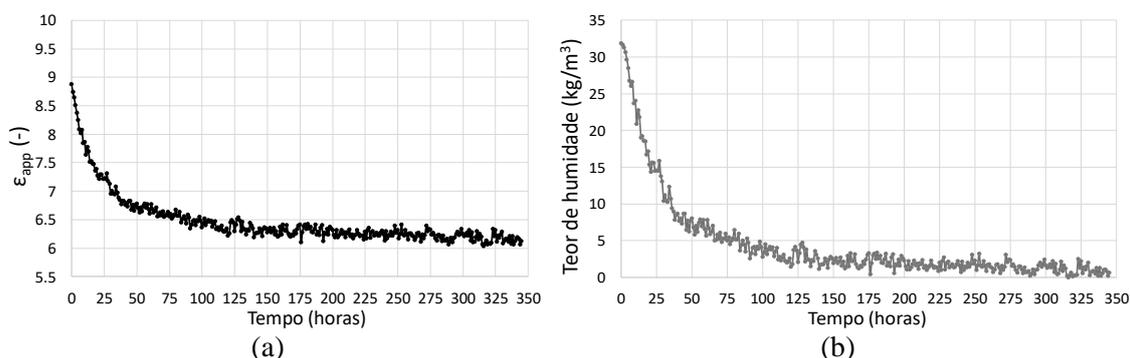


Figura 5 – Resultados obtidos durante a secagem de uma amostra de pedra calcária: (a) evolução da permissividade dielétrica relativa, ϵ_{app} , durante o período de secagem; (b) evolução do teor de humidade, $w(\text{kg}/\text{m}^3)$, durante o período de secagem.

Os resultados obtidos são compatíveis com o expectável para um processo de secagem, tendo-se, portanto, demonstrado que a metodologia descrita na Figura 2 é adequada para avaliar quantitativamente o teor de humidade ao longo do tempo em materiais de construção consolidados.

5. Conclusões

Monitorizar o teor de humidade em materiais de construção é uma tarefa complexa e que é ainda objeto de investigação por parte da comunidade científica. A técnica Time-Domain Reflectometry (TDR) é amplamente utilizada em diversos domínios, nomeadamente na medição do teor de humidade dos solos, mas a sua aplicação em materiais de construção consolidados é ainda pouco frequente e inovadora. A falta de sensores TDR adequados, as dificuldades na sua instalação, a inexistência de curvas de calibração apropriadas e a necessidade de desenvolver ferramentas automáticas para processamento do sinal são considerados os maiores obstáculos à utilização da técnica em materiais de construção. Neste trabalho foi proposta uma metodologia composta por seis etapas principais, com o intuito de clarificar sinteticamente como ultrapassar os referidos obstáculos e proporcionar avaliações bem-sucedidas do teor de humidade, quer de forma qualitativa quer quantitativa, com o método TDR (Figura 2). Ao contrário dos materiais altamente porosos onde a técnica já foi testada, a metodologia desenvolvida foi aplicada em amostras de pedra calcária e tijolo sólido. Os resultados obtidos mostram que, com a metodologia proposta, é possível monitorizar variações relativas do teor de humidade ao longo do tempo, de uma forma relativamente simples, e que é muitas vezes suficiente para algumas aplicações práticas da engenharia civil (Figura 3). Adicionalmente, o ensaio de secagem efetuado numa amostra de pedra calcária mostrou que a técnica é capaz de medir de forma contínua o teor de humidade neste material, apesar da sua baixa porosidade (Figura 4 e Figura 5). No futuro, pretende-se aplicar a sequência de procedimentos propostos para monitorizar o teor de humidade em paredes à escala real, bem como encorajar novos desenvolvimentos que potenciem uma utilização mais generalizada da técnica e a tornem mais apelativa para a prática profissional.

Agradecimentos

A primeira autora agradece o apoio financeiro concedido pela FCT, por intermédio da bolsa de doutoramento SFRH/BD/121549/2016.

Este trabalho foi apoiado financeiramente por: Financiamento Base – UIDB/04708/2020 e Financiamento Programático – UIDP/04708/2020 da Unidade de Investigação CONSTRUCT – Instituto de I&D em Estruturas e Construções, financiada por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC); Projeto CLING – Orientações para o projeto de edifícios baseadas nas

alterações climáticas – financiado por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC), no âmbito do projeto PTDC/EME-REN/3460/2021.

Referências

- [1] S. E. Pinchin, Techniques for monitoring moisture in walls, *Studies in Conservation*, 53 (2008) 33-45.
- [2] M. C. Phillipson et al., Moisture measurement in building materials: An overview of current methods and new approaches, *Building Services Engineering Research and Technology*, 28 (2007) 303-316. doi: 10.1177/0143624407084184.
- [3] A. Cataldo, G. Cannazza, E. De Benedetto, L. Tarricone, M. Cipressa, Metrological assessment of TDR performance for moisture evaluation in granular materials, *Measurement*, 42 (2009) 254-263, 2009. doi: 10.1016/j.measurement.2008.06.006.
- [4] H. He et al., A review of time domain reflectometry (TDR) applications in porous media, *Advances in Agronomy*, 168 (2021) 83-155. doi: 10.1016/bs.agron.2021.02.003.
- [5] A. Scheuermann, C. Huebner, S. Schlaeger, N. Wagner, R. Becker, A. Bieberstein, Spatial time domain reflectometry and its application for the measurement of water content distributions along flat ribbon cables in a full-scale levee model, *Water Resources Research*, 46 (2009). doi: 10.1029/2008WR007073.
- [6] L. Fiala, M. Pavlíková, Z. Pavlík, Application of TDR method for moisture profiles measurement in cellular concrete, In 1st International Doctoral Conference and Advanced Materials, 23-25 July, 11-15, 2014. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.982.11.
- [7] Z. Suchorab, Monitoring of capillary rise phenomenon in calcium silicate board using the surface TDR probes set, *Proceedings of ECOpole*, 8 (2014) 82-86. doi: 10.2429/proc.2014.8(1)010.
- [8] A. Cataldo, Egidio De Benedetto, Giuseppe Cannazza, E. Piuze, E. Pittella, Moisture content monitoring of construction materials: From in-line production through on-site applications, In 2017 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), Torino, Italy, 22-25 May, 1-5, 2017. doi: 10.1109/I2MTC.2017.7969762.
- [9] L. Mollo, R. Greco, Moisture measurements in masonry materials by time domain reflectometry, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23 (2011) 441-444. doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000188.
- [10] Laboratory TDR probe. Easy-Test. <https://www.e-test.eu/laboratory-tdr-probe.html> (acesso em 04 julho 2022).
- [11] Field TDR probe. East-Test. <https://www.e-test.eu/field-tdr-probe.html> (acesso em 04 julho 2022).
- [12] CS616: 30 cm Water content reflectometer. Campbell Scientific. <https://www.campbellsci.com.br/cs616-reflectometer> (acesso em 04 julho 2022).
- [13] H. Sobczuk, Polish Patent No. 198492 B1, 30 June 2008.
- [14] G. C. Topp, J. L. Davis, A. P. Annan, Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines, *Water resources research*, 16 (1980) 574-582.
- [15] M. A. Malicki, R. Plagge, C. H. Roth, Improving the calibration of dielectric TDR soil moisture determination taking into account the solid soil, *European Journal of Soil Science*, 47 (1996) 357-366. doi: 10.1111/j.1365-2389.1996.tb01409.x.
- [16] Z. Pavlík, M. Pavlíková, L. Fiala, R. Černý, H. Sobczuk, Z. Suchorab, Application of time-domain reflectometry method for measuring moisture content in porous building materials, *Trends in Applied Sciences Research*, 2 (2007) 188-200.
- [17] M. C. Phillipson, P. H. Baker, M. Davies, Z. Ye, G. H. Galbraith, R. C. McLean, Suitability of time domain reflectometry for monitoring moisture in building materials, *Building Services Engineering Research and Technology*, 29 (2008) 261-272. doi: 10.1177/0143624408092423.
- [18] K. Roth, R. Schulin, H. Flühler, W. Attinger, Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach, *Water Resources Research*, 26 (1990) 2267-2273. doi: 10.1029/WR026i010p02267.
- [19] Z. Pavlík, L. Fiala, and R. Černý, Analysis of dielectric mixing models for the moisture

- assessment of porous building materials, *Pollack Periodica*, 4 (2009) 79-88. doi: 10.1556/Pollack.4.2009.2.8.
- [20] Z. Pavlík, J. Mihulka, L. Fiala, and R. Černý, Application of Time-Domain Reflectometry for measurement of moisture profiles in a drying experiment, *International Journal of Thermophysics*, 33 (2012) 1661-1673. doi: 10.1007/s10765-011-1020-0.
- [21] T. Stingl Freitas, A. Sofia Guimarães, S. Roels, V. Peixoto De Freitas, A. Cataldo, Time Domain Reflectometry (TDR) technique - A solution to monitor moisture content in construction materials, in *E3S Web of Conferences*, 172 (2020) doi: 10.1051/e3sconf/202017217001.
- [22] T. S. Freitas, A. S. Guimarães, S. Roels, V. P. de Freitas, A. Cataldo, Is the time-domain reflectometry (TDR) technique suitable for moisture content measurement in low-porosity building materials?, *Sustainability (Switzerland)*, 12 (2020) 7855. doi: 10.3390/SU12197855.