



Engenharia Civil UM

desde 1995



Os Editores:

José Barroso de Aguiar

Sandra Cunha

NÚMERO

Especial
65

2023

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

Estudo de parâmetros mecânicos de dois solos arenosos estabilizados com cimento

L.F.M. Pereira, F.G. Branco, P.V. Oliveira, P.S. Andrade

6

Influência da incorporação de resíduos de construção e demolição funcionalizados com material de mudança de fase nas propriedades mecânicas de betões

Z.Y. Jia, S. Cunha, J. Aguiar

16

Impacto de estratégias de aquecimento nos sistemas de construção LSF: avaliação do conforto térmico e desempenho energético

R.M.S.F. Almeida, R. Vicente, A. Figueiredo, M. Figueiredo

28

Comportamento físico de janelas em fibra de vidro

N. Simões, N. Vieira, J. Prata, A. Vieira

37

Termografia de infravermelhos para análise de humidade em paredes – ensaios preliminares e perspectivas futuras

L.C.M. Dafico, E. Barreira, R.M.S.F. Almeida, R.S. Vicente

47

Avaliação de desempenho de argamassas auto-compactáveis com óxido de grafeno

I. Junior, P.R. da Silva, L. Evangelista

60

Estudo de parâmetros mecânicos de dois solos arenosos estabilizados com cimento

Study of the mechanical parameters of two sandy soils stabilized with cement

L.F.M. Pereira^{a†}, F.G. Branco^a, P.V. Oliveira^a, P.S. Andrade^b

^a *Universidade Coimbra, Departamento de Engenharia Civil, Coimbra, Portugal*

^b *Universidade Coimbra, Departamento de Ciências da Terra, Coimbra, Portugal*

[†] *Autor para correspondência: lfmperreira@student.uc.pt*

RESUMO

O solo é o material natural de construção mais abundante na natureza e detém muitas vezes propriedades excelentes que o tornam apetecível enquanto material de construção: é resistente, esteticamente agradável, plástico, e tem um baixo custo. Sendo uma das metas primordiais de uma obra a racionalização de custos, a utilização dos solos existentes no local é, desde há muito tempo, um objetivo apetecível. No entanto, nem todos os solos, devido a fatores tais como a granulometria, a composição mineralógica ou a presença de matéria orgânica, se comportam de modo aceitável em termos mecânicos. A adição de cimento Portland modifica as propriedades dos solos através de processos físico-químicos entre os grãos do solo e o cimento, promovendo a formação de um esqueleto que cimenta e envolve os grãos. Neste trabalho estudou-se a melhoria de dois solos através da estabilização com cimento Portland. Os resultados obtidos permitiram concluir que o comportamento mecânico melhorou com o tempo de cura dos provetes e com o aumento do teor de ligante. Foi ainda possível definir uma razão entre a resistência à compressão diametral e a resistência à compressão uniaxial simples. Determinou-se que existe um teor em água “ótimo” que permite obter um comportamento mecânico mais competente. Concluiu-se que existe uma razão água/cimento (w/c) “ótima” para cada teor de ligante, e que esta tende a diminuir com o aumento deste último.

ABSTRACT

Soil is the most abundant natural building material in nature and often has excellent properties that make it attractive to use in construction due to its resistance, pleasant aesthetic appearance, plasticity, and low cost. Since one of the main goals of a project is to rationalize costs, the use of existing soils on site has long been an attractive objective. Nevertheless, not all soils, due to factors such as granulometry, mineralogical composition or the presence of organic matter, behave in an acceptable way in mechanical terms. The addition of Portland cement modifies soil properties through physical-chemical processes between soil grains and cement, promoting the formation of a skeleton that cements and surrounds the grains. In this work, the improvement of two soils through stabilization with Portland cement was studied. The results obtained allowed us to conclude that the mechanical behavior improved with the curing time of the specimens and with the increase in the binder content. It was also possible to define a ratio between the diametral compressive strength and the simple uniaxial compressive strength. It was determined that there is an “optimal” water content that allows to obtain a more competent mechanical behavior. It was concluded that there is an “optimal” water/cement (w/c) ratio for each binder content, and that this ratio tends to decrease with the increase of the latter.

Palavras-chave:

Solo-cimento;
estabilização;
comportamento
mecânico; água.

Keywords:

Soil-cement;
stabilization;
mechanical
behaviour.

1. Introdução

O aumento da população mundial e consequente desenvolvimento das sociedades modernas criou uma tendência migratória no sentido dos grandes centros populacionais. Este facto teve como consequência um aumento premente da necessidade de se criarem todo o tipo de infraestruturas que facultassem alojamento e promovessem a facilidade de deslocação e o armazenamento de recursos naturais que contribuam para uma melhoria da qualidade de vida. Qualquer obra de engenharia tem como objetivo primordial a contenção de custos, apenas possível se se tiver também a preocupação de se encontrarem técnicas atrativas tanto do ponto de vista económico como ambiental. A utilização de solos existentes em obra ou nas proximidades desta ajuda a uma racionalização de custos e reduz os impactos ambientais resultantes da exploração e transporte desses materiais ao longo de grandes distâncias. Adicionalmente, a aplicação do que seria um resíduo a descartar num novo material de construção contribui para a transição para uma circularidade de recursos, que atualmente se pretende sistémica e global. A crescente noção de que habitamos um planeta com recursos finitos exige que se abandone progressivamente o uso e descarte de bens e recursos (economia linear) [1]. Globalmente, as obras de construção civil consomem cerca de 75% dos recursos naturais extraídos da natureza sendo que a construção de edifícios utiliza 40% dos recursos minerais, 40% da energia e 16% da água consumidos anualmente. Em Portugal, o sector da construção produz anualmente cerca de 7,5 milhões de toneladas de resíduos sólidos [2].

O solo é o material de construção natural mais abundante no planeta. Para Matos Fernandes [3], o solo é formado por partículas minerais, que resultaram da desintegração física e da decomposição química das rochas, podendo também conter matéria orgânica. Os espaços não ocupados pelas partículas são designados por poros ou vazios. Estes podem conter água e ar, de forma isolada ou conjuntamente. Quando os poros estão integralmente preenchidos por água diz-se que o solo está saturado. O solo é detentor de características que o tornam atrativo enquanto material de construção. Este material é resistente, muitas vezes esteticamente agradável, plástico e barato. Wang [4] refere que a primeira utilização de solo estabilizado com cimento terá ocorrido aquando da construção de uma estrada nos Estados Unidos da América, na Florida, em 1915. Atualmente, as misturas de solo-cimento são aplicadas em variadas situações, desde construção de taludes, proteção de leitos de cursos de água [5], bases e sub-bases para pavimentos [6][7], aterros de caminhos de ferro e autoestradas [8], em fundações superficiais [9], camadas de impermeabilização [10], no fabrico de tijolos e blocos para alvenaria, ou até na construção de edifícios [11].

No presente trabalho, estudou-se a melhoria de dois solos através da estabilização com cimento Portland. Realizaram-se testes de caracterização dos materiais estudados, tendo posteriormente sido realizados ensaios no sentido de avaliar o desempenho de provetes de solo melhorado quando sujeito a ensaios de compressão simples e diametral. O presente documento descreve os procedimentos adotados, bem como os resultados obtidos.

2. Materiais e métodos

2.1. Materiais utilizados

2.1.1 - Solo_Coimbra

Solo de cariz arenoso que foi utilizado na definição da melhor metodologia de compactação.

2.1.2 - Solo_Leiria

Recolhido na zona de Leiria, na parte inferior de um talude exposto a Sudeste, entre os lugares de Pousos e Marrazes. Enquadra-se, em termos geológicos, na Orla Sedimentar Ocidental da Península Ibérica. A análise da área circundante permitiu identificar este solo como pertencendo ao Pliocénico de fácies continental [12]. A Figura 1 mostra o local de recolha do Solo_Leiria.

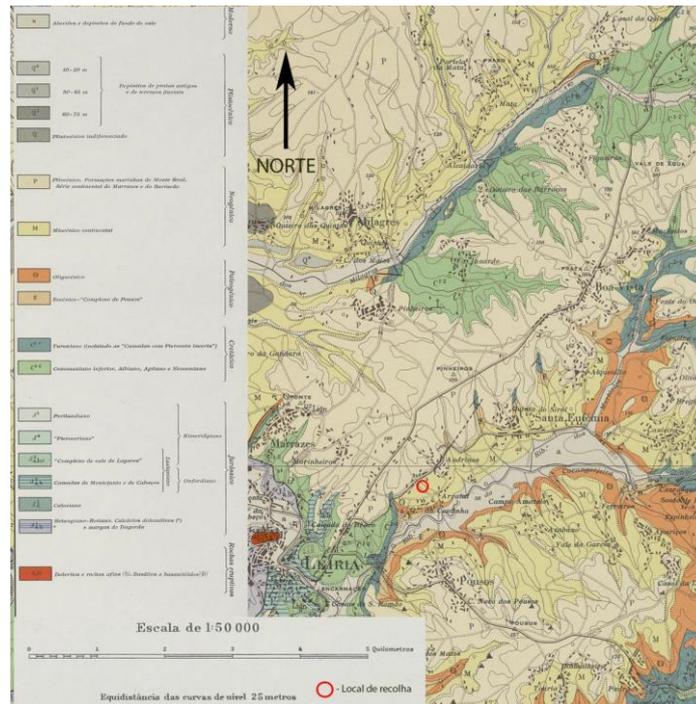


Figura 1 – Pormenor do ponto de recolha do Solo_Leiria, na carta geológica 23-C (Leiria).

2.1.3 - Cimento e água

Neste estudo foi utilizado cimento tipo Portland CEM II B/L 32,5N. Foi utilizada água canalizada da rede pública de abastecimento.

2.2. Programa experimental

Os objetivos deste estudo foram os de avaliar a influência do teor em cimento e do teor em água no comportamento mecânico da mistura de solo-cimento, através da realização de ensaios de compressão uniaxial simples (UCS) e de compressão diametral (CD). Inicialmente, realizaram-se ensaios de identificação e caracterização, nomeadamente análise granulométrica, limites de Atterberg, e o ensaio Proctor, a ambos os solos. Numa primeira fase, foram preparados 18 provetes utilizando o Solo_Coimbra. Na preparação desses provetes, utilizaram-se três métodos de compactação diferentes, o Proctor leve (PL), o Proctor pesado (PP), e o método da compactação por apiloamento (AP). Assim, foram preparados três provetes para cada tipo de ensaio e por metodologia de compactação, um para ensaiar aos sete dias de idade (P1), e dois para ensaiar aos vinte e oito dias de idade (P1 e P2). Os provetes todos foram identificados com a numeração do provete, seguida do tipo de compactação, data de ensaio e finalmente o tipo de ensaio (ex: P1_AP_7D_CS). Os provetes foram descofrados no dia seguinte à sua preparação, armazenados em câmara húmida, e ensaiados aos 7 e aos 28 dias de cura. Tal como já referido, o objetivo desta fase de ensaios visava identificar, com base nos resultados da resistência mecânica obtidos, qual o método de compactação mais eficaz para este tipo de provetes. A Tabela 1 apresenta o programa experimental executado neste estudo.

Na 2ª fase do programa experimental, prepararam-se cento e cinquenta provetes com o método de compactação determinado na 1ª fase definido como o mais adequado (compactação Proctor Leve). A Tabela 2 mostra a quantidade de provetes produzidos para cada teor de cimento (30 provetes), tipo de ensaio (compressão simples (CS) e compressão diametral (CD) e (sete dias (7D) e vinte e oito dias (28D)). Assim, por exemplo, CS28D corresponde a um provete ensaiado em compressão simples, com idade de 28 dias. Para além destes provetes, foram ainda preparados provetes para 8, 10, 12 e 14% de teor de cimento, totalizando 150 provetes. Mais uma vez, todos os provetes foram inequivocamente identificados com o número do provete, seguido do teor em cimento, teor em água, tempo de cura e finalmente com a tipologia de ensaio

(ex: P1_12C_11H_7D_CD).

Tabela 1 – Programa experimental adotado neste estudo.

Fase do programa experimental	Material	Ensaio	Nº de ensaios realizados
Caracterização do material	Solo_Coimbra	Análise Granulométrica	1
		Limite de Plasticidade	Não plástico
		Limite de Liquidez	Não plástico
		Ensaio Proctor	2
	Solo_Leiria	Análise Granulométrica	1
		Limite de Plasticidade	Não plástico
		Limite de Liquidez	Não plástico
Resistência Mecânica	Solo_Coimbra – (Fase 1)	Ensaio Proctor	1
		Compressão Simples	9
	Solo_Leiria – (Fase 2)	Compressão Diametral	9
		Compressão Simples	75
		Compressão Diametral	75

Tabela 2 - Exemplo de quantidades de provetes preparados para um teor de cimento (CEM) de 6%.

% de CEM	% de Água	Tipo de ensaio e tempo de cura			
		CS7D	CD7D	CS28D	CD28D
6	7	1	1	2	2
	9	1	1	2	2
	11	1	1	2	2
	13	1	1	2	2
	15	1	1	2	2

2.3 - Identificação e caracterização dos solos

Foram realizados ensaios de identificação e caracterização dos solos, nomeadamente a análise granulométrica seguindo a norma LNEC E 239 [13], limites de Atterberg, seguindo as indicações da norma NP 143 [14], e o ensaio Proctor [15]. Com base nos resultados de alguns destes ensaios, os dois solos deste estudo foram classificados segundo as duas classificações mais utilizadas no nosso país, a especificação LNEC E 240 – 1970 - “Solos. Classificação para fins rodoviários” [16], e a norma ASTM D 2487 – 00 – “Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)” [17].

3. Resultados

3.1 - Análise granulométrica

A figura 2 apresenta as análises granulométricas realizadas aos solos estudados neste trabalho.

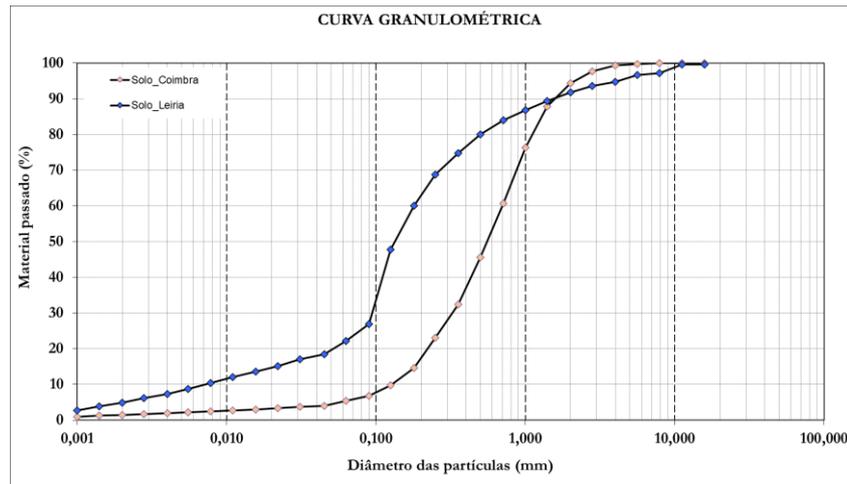


Figura 2 – Análises granulométricas dos solos estudados neste trabalho.

Do gráfico da Figura 2, retira-se que o Solo_Coimbra é composto por cerca de 82,5% de partículas de dimensão areia (0,075 – 2mm), e por cerca de 17% de partículas de dimensão cascalho (neste caso concreto, de 2mm a 25,4mm). A percentagem de partículas de dimensão inferior a 0,075mm (silte e argila), é de cerca de 0,8%. Já o Solo_Leiria compreende cerca de 8,24% de partículas de dimensão cascalho, 69% de partículas arenosas, 17% de partículas siltosas, e 5,5% de partículas argilosas.

3.2 - Limites de consistência

Uma vez que ambos os solos estudados não contêm pelo menos 30% em massa de partículas com dimensão inferior a 0,05 mm, foram considerados não plásticos.

3.3 - Ensaio Proctor

A Figura 3 apresenta a curva de baridade seca máxima versus teor em água para ambos os solos.

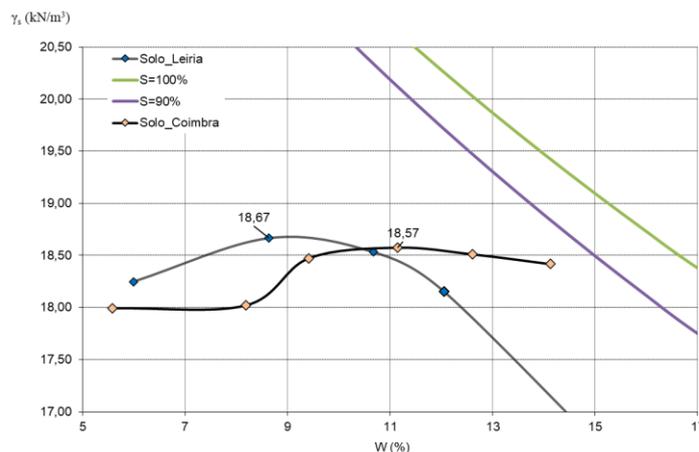


Figura 3 – Resultados dos ensaios de compactação leve realizados no Solo_Coimbra e Solo_Leiria.

Da análise da figura 3 verifica-se que, para o Solo_Coimbra, o teor em água que permite atingir a baridade seca mais elevada de 18,57 kN/m³, é de 11,1%. Já para o Solo_Leiria, o ensaio Proctor permitiu definir o teor em água ótimo de 8,63%, que permitiu alcançar uma baridade seca máxima de 18,67 kN/m³.

3.4 - Comparação da baridade seca máxima do solo não ligado com as diferentes misturas

Na Figura 4 é possível observar a curva de compactação do Solo_Leiria, assim como as características dos provetes moldados com as diferentes percentagens de ligante.

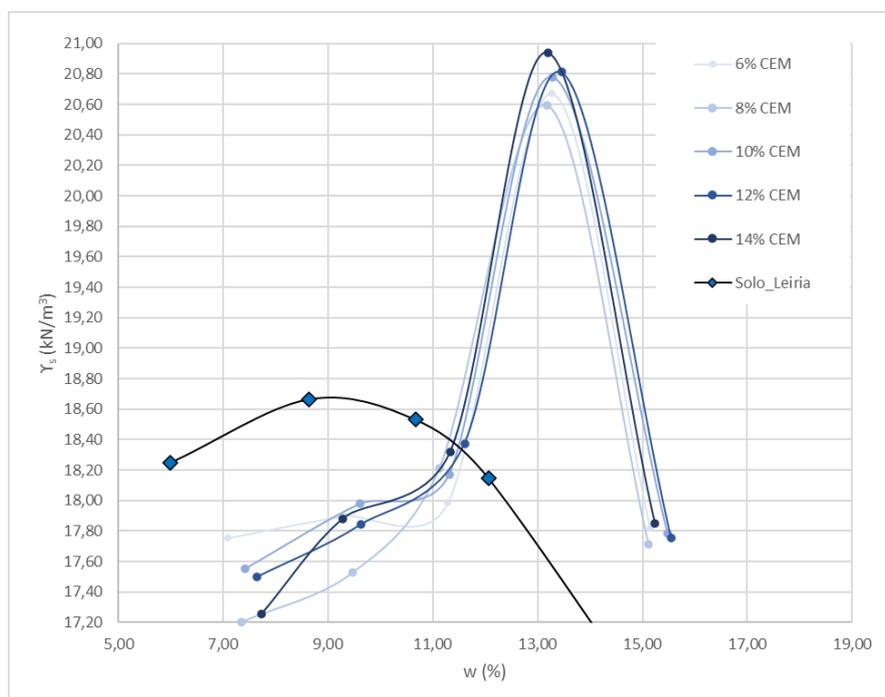


Figura 1 - Peso volúmico dos provetes moldados com solo estabilizado (compactados) e Proctor do solo não estabilizado.

Analisando Figura 4, pode concluir-se que a influência do ligante é muito importante na baridade seca da mistura solo-cimento. À esquerda do teor em água ótimo determinado no ensaio Proctor (8,63%), a água que no solo não estabilizado exerce um efeito de redução do atrito entre as partículas do solo permitindo uma compactação mais eficaz (e crescente à medida que se vai aumentando o teor em água até pico da curva) é reclamada pelos constituintes do cimento. Uma consequência é a de muitos dos provetes preparados com 7% (e mesmo alguns com 9%) de teor em água não atingirem valores tão elevados de peso volúmico seco como o do solo não tratado. Outra consequência é a do deslocamento do pico de compactação ótimo das misturas de solo-cimento para a direita e para cima da curva do solo não estabilizado, para valores de γ_s a rondar os 20,5 a 20,9 kN/m³, e um correspondente teor em água ótimo próximo dos 13%-13,5%.

Isto deve-se provavelmente à incorporação das partículas de cimento, mais finas, na mistura, e à sua densidade mais elevada.

3.5 - Classificação dos solos

3.5.1 - Especificação LNEC E240 – 1970 – “Solos. Classificação para fins rodoviários”

Analisando as curvas granulométricas do Solo_Coimbra em pontos-chave como o são a percentagem acumulada de material passada nos peneiros 2 mm (nº10), 0,425 mm (nº 40), e 0,075 mm (nº 200), verifica-se que o solo se enquadra no grupo A-1-b do quadro “Classificação de Solos” do anexo da especificação LNEC E 240 – 1970.

Projetando a percentagem de material passado no peneiro com malha de 0,075 mm (nº 200) nos dois ábacos em anexo da mesma especificação, chegamos ao índice de grupo deste material: 0. Deste modo, o Solo_Coimbra é classificado como A-1-b (0), sendo o material característico deste subgrupo uma “areia grossa, com ou sem material aglutinante bem graduado”, prevendo-se um comportamento na camada sob o pavimento de “excelente a bom”.

Analisando a curva granulométrica do Solo_Leiria nos mesmos pontos chave, classificou-

se este solo como A-2-4 (0). Este subgrupo é constituído por vários materiais granulares contendo 35% ou menos de partículas com dimensão inferior a 0,074 mm. Para além disso, a fração que passa no peneiro 0,420 mm é não plástica. Prevê-se um comportamento na camada sob o pavimento de “excelente a bom”.

3.5.2 - Classificação unificada dos solos

Para classificar o Solo_Coimbra seguindo as diretrizes desta norma, é então necessário analisar a curva granulométrica. Atendendo a que mais de 50% do solo passa no peneiro 4,75 mm (passa cerca de 95% do solo), e que o C_u é inferior a 6 ($C_u=5$) e o C_c se situa entre 1 e 3 ($C_c=1,11$), o solo é classificado com o nome de grupo SP-SM – areia mal graduada com silte.

Analisando a curva granulométrica do Solo Leiria, e atendendo ao facto de que cerca de 76% do solo fica retido no peneiro com malha de 0,075mm, o solo é inicialmente enquadrado como “solo grosseiro”. Uma vez que, da fração retida no peneiro de 0,075mm, cerca de 75% passa no peneiro com malha de 4,75mm, o solo é enquadrado como sendo uma areia. Finalmente, como passam mais de 12% de partículas no peneiro com malha de 0,075mm, e os finos apresentam características (de acordo com a ASTM 2488) que se encaixam na categoria de “silte”, o solo é classificado como SM – areia com silte.

3.6 - Resistência mecânica

3.6.1 - Efeito do teor em água na resistência à compressão

Apresentam-se os resultados da resistência à compressão em função do teor em água final, para os diferentes teores em cimento. A Figura 5 ilustra a evolução da resistência à compressão simples em função do teor em água para diversos teores em cimento e tempos de cura.

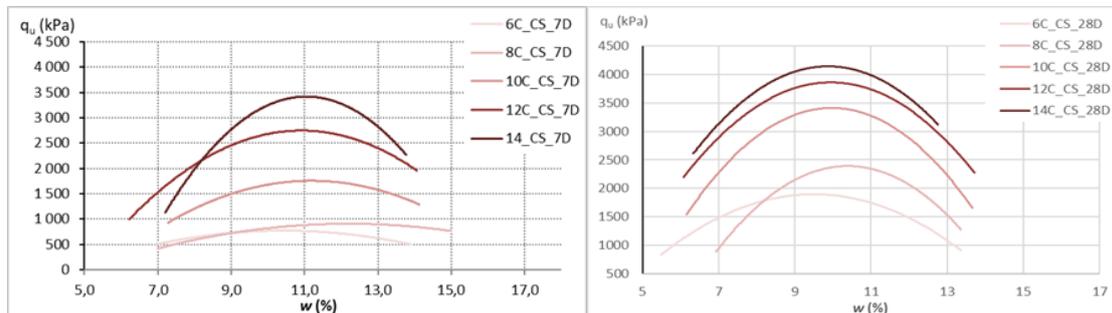


Figura 2 - Evolução da resistência à compressão simples (CS) aos 7 dias e 28 dias de idade.

Da análise da Figura 5, verifica-se que o teor em água final ao qual corresponde uma resistência à compressão simples mais elevada se situa entre os 9% e os 10%, sendo que estes provetes foram inicialmente preparados com um teor em água de 11%. Conclui-se que a crescente disponibilidade de água na mistura até esses valores percentuais exerce um papel positivo na evolução da resistência à compressão simples, possibilitando a génese de um maior número de ligações entre os minerais hidratados do cimento e as partículas do solo. Acima destes teores “ótimos”, a quantidade de água na mistura é excessiva, diminuindo provavelmente a densidade das ligações entre os minerais hidratados do ligante e o solo, traduzindo-se em resultados de compressão uniaxial simples mais reduzidos. A Figura 6 mostra a resistência à tração obtidas em ensaio de compressão diametral para diversos teores em água, teores em cimento e tempos de cura.

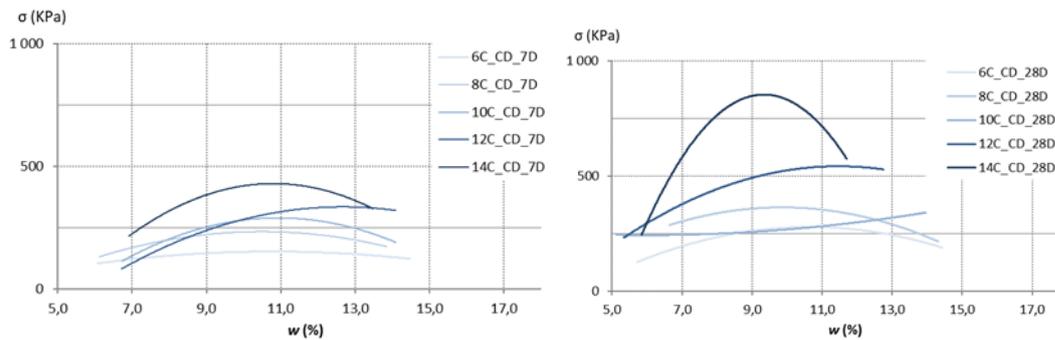


Figura 3 - Evolução da resistência à compressão diametral (CD) aos 7 dias e 28 dias de idade.

Apesar de, naturalmente, se verificarem resultados mais dispersos, sendo, por vezes, difícil definir um teor em água ao qual corresponda um comportamento mecânico mais competente, a análise dos gráficos permite concluir que existe um teor em água “ótimo” da mistura que permite a obtenção dos melhores resultados na resistência à compressão diametral. Este teor em água situa-se cerca dos 9%-11%, e demonstra, tal como mencionado nos ensaios de compressão uniaxial simples, que a crescente disponibilidade de água na mistura até aos valores “ótimos” de teor em água influencia de modo positivo a evolução da resistência à compressão diametral, culminando num maior número de ligações entre os minerais hidratados do cimento e as partículas do solo. A partir de certa altura (valores de teor em água acima dos 12%), a quantidade de água na mistura é demasiada, diminuindo provavelmente a densidade das ligações entre os minerais hidratados do ligante e o solo, refletindo-se nos valores mais baixos obtidos neste ensaio.

3.7 - Relação entre a resistência à compressão diametral e a resistência à compressão simples

Para o presente estudo, foi possível determinar uma razão entre a resistência à compressão diametral e a resistência à compressão uniaxial simples. Este valor é de 0,16, sendo semelhante aos valores obtidos por Consoli et al. [18] (aproximadamente 0,15), para uma areia oriunda de Porto Alegre, no Brasil (areia de Osorio). Segundo o mesmo autor, esta relação é útil para definição de metodologias de dosagem, uma vez que os critérios racionais podem basear-se nos resultados de um destes ensaios, dada a sua interdependência. Os resultados estão patentes na figura 7. Na figura estão representadas as relações entre σ/q_u , para todas as percentagens de cimento e de água, por exemplo: a primeira coluna cinzenta representa a relação σ/q_u calculada a partir da média de todos os provetes preparados com um teor de cimento de 6% (e todos os teores em água). A primeira coluna a azul representa a relação σ/q_u calculada a partir da média de todos os provetes preparados com um teor de água de 7% (e todos os teores de cimento).

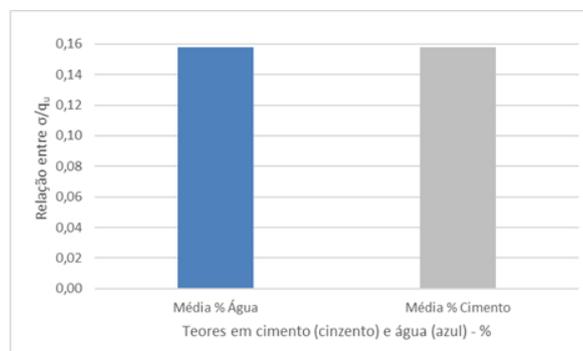


Figura 4 - Médias das relações entre σ/q_u , por teores em cimento (a cinzento), e por teores em água (a azul). À esquerda, as médias por cada teor em cimento e por cada teor em água, e à direita, a média de todos os teores em cimento (a cinzento), e a média de todos os teores em água (a azul).

5. Conclusões

A análise detalhada do Solo_Leiria demonstrou que é um solo não problemático e com características razoáveis para utilização em obras de engenharia.

Os maiores pesos volúmicos secos de todas as misturas de solo-cimento deste estudo (6% a 14%) são alcançados com teores em água iniciais entre 13% e 13,5%.

Tanto a resistência à compressão simples, como a resistência à tração aumentam com o incremento do tempo de cura.

UCS - Os ensaios realizados neste estudo mostraram que os provetes preparados com um teor em água de 11% revelaram um comportamento mecânico mais competente. Aquando do ensaio, estes provetes apresentavam um teor em água que se situava entre os 9% e os 10% e, para os teores em cimento mais elevados (10%, 12% e 14%) atingiram-se valores de resistência à compressão simples que rondam os 4000 kPa. Verifica-se ainda que, ao contrário do que é habitual no betão, os valores de resistência à compressão simples aos 7 dias de cura são muito inferiores aos valores observados em provetes de betão (75% do valor expectável aos 28 dias de cura). De facto, a resistência à compressão simples aos 7 dias de cura atinge cerca de 50% dos valores obtidos nos ensaios aos provetes com 28 dias de cura.

CD - Os ensaios de compressão diametral mostraram, tal como era expectável, uma maior variabilidade de resultados. Não obstante, verificou-se também que os teores em água “ótimos” para um solo com estas características se situam entre os 9%-11%.

Acima destes valores, em particular nos provetes com um teor em água de 15% verificou-se, invariavelmente, um decréscimo da resistência à compressão diametral. A incoerência dos valores foi mais visível nos provetes preparados com um teor em cimento mais baixo (6% e 8%), nos quais alguns dos provetes com 28 dias mostraram um comportamento semelhante e até mesmo inferior a alguns provetes com 7 dias.

Foi possível determinar uma razão entre a resistência à compressão diametral e a resistência à compressão uniaxial dos provetes estabilizados de 0,16.

5.1 - Considerações finais

Neste trabalho estudou-se a melhoria de dois solos através da estabilização com cimento Portland. Os resultados obtidos permitiram concluir que o comportamento mecânico melhorou com o tempo de cura dos provetes e com o aumento do teor de ligante. Foi ainda possível definir uma razão entre a resistência à compressão diametral e a resistência à compressão uniaxial simples. Determinou-se que existe um teor em água “ótimo” que permite obter um comportamento mecânico mais competente. Concluiu-se que existe uma razão água/cimento (w/c) “ótima” para cada teor de ligante, e que esta tende a diminuir com o aumento deste último.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado por Fundos Nacionais através da FCT/MCTES – Fundação para a Ciência e Tecnologia/Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior, no âmbito do CTAC – Centro de Território, Ambiente e Construção – UIDB/0407/2020.

Este trabalho foi parcialmente financiado pela FCT/MCTES através de fundos nacionais (PIDDAC) no âmbito da Unidade de I&D Instituto de Sustentabilidade e Inovação em Engenharia de Estruturas (ISISE), sob a referência UIDB/04029/2020, e pelos fundos FEDER através do CENTRO 2020, PORTUGAL 2020, no âmbito do projeto CENTRO-01-0247-FEDER-047067 (Life4stone).

Referências

- [1] M. De Wit, The CIRCULARITY GAP report, no. January, 2018.
- [2] J. P. Teixeira, M. Pereira, J. A. Teixeira, Circular Economy in the Civil Construction Sector I, Lisbon and Tagus Valley Regional Coordination and Development Commission, 2019.

- [3] M. de Matos Fernandes, *Mecânica dos Solos, Conceitos e Princípios Fundam.*, 1, p. 3, 2006.
- [4] G. Zhang, C. Chen, Y. Zhang, H. Zhao, Y. Wang, X. Wang, Optimised neural network prediction of interface bond strength for GFRP tendon reinforced cemented soil, *Geomech. Eng.*, 28 (6) (2022), 599–611. <https://doi.org/10.12989/gae.2022.28.6.599>.
- [5] N. I. D. USACE, US Army Corps of Engineers National Inventory of Dams, 2000.
- [6] D. Foppa, *Análise de variáveis-chave no controle da resistência mecânica de solos artificialmente cimentados análise de variáveis-chave no controle da*, 2005.
- [7] ACI, ACI 230.1R-09. Report on Soil Cement - American concrete institute, 2009.
- [8] O. G. Ingles, J. B. Metcalf, *Soil stabilization principles and practice*, 1972.
- [9] P. J. V Oliveira, A. A. S. Correia, J. Teles, D. G. Custódio, Effect of fibre type on the compressive and tensile strength of a soft soil chemically stabilised, *Geosynth. Int.*, 23(3) (2016) 171–182.
- [10] J. Carreto, L. Caldeira, E. Maranha das Neves, Processes Involved in the Formation and Performance of Self-Hardening Slurry Walls: Santa Clara-a-Velha Monastery Cutoff Wall, *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, 142(7) (2016) 4016019.
- [11] T. V LIMA, Study of the production of soil-cement blocks with raw materials from the urban core of the city of Campos dos Goytacases-RJ, Master's Thesis, Science and Technology Center/UENF Campos dos Goytacases, 2006.
- [12] C. Teixeira, G. Zbyszewski, C. T. de Assunção, G. Manuppella, Geological map of Portugal on the scale of 1/50000: Explanatory notice of the geological map 23-C, Leiria, Geological Services of Portugal, 1968.
- [13] LNEC, LNEC E 239 - *Análise Granulométrica Por Peneiração Húmida*, Portugal, 1970.
- [14] NP 143, *Determinação dos limites de consistência*, 143, 1969.
- [15] E-197-66-PROCTOR, 1966.
- [16] LNEC:240, E 240 (1971)-Soils, 1970.
- [17] ASTM D2487, ASTM:2487 -0, Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System, 2003.
- [18] N. C. Consoli, R. C. Cruz, M. F. Floss, L. Festugato, Parameters controlling tensile and compressive strength of artificially cemented sand, *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, 136(5) (2010) 759–763. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000278](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000278).

ORCID

Luís Filipe Monteiro Pereira	0000-0002-8913-8836 (https://orcid.org/0000-0002-8913-8836)
Fernando José Forte Garrido Branco	0000-0002-8648-678X (https://orcid.org/0000-0002-8648-678X)
Paulo José da Venda Oliveira	0000-0001-8515-8664 (https://orcid.org/0000-0001-8515-8664)
Pedro Santarém Andrade	0000-0002-6776-991X (https://orcid.org/0000-0002-6776-991X)

Influência da incorporação de resíduos de construção e demolição funcionalizados com material de mudança de fase nas propriedades mecânicas de betões

Influence of the incorporation of construction and demolition waste functionalized with phase change material on the mechanical properties of concrete

Z.Y. Jia^{a†}, S. Cunha^a, J. Aguiar^a

^a *Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Guimarães, Portugal*

[†] *Autor para correspondência: pg39237@uminho.pt*

RESUMO

O crescimento das urbanizações levou ao rápido desenvolvimento da indústria da construção, originando uma grande quantidade de resíduos de construção e demolição (RCD) e em simultâneo um aumento nos consumos energéticos e emissões de dióxido de carbono (CO₂) para a atmosfera. A aplicação simultânea de RCD e tecnologias de calor latente incorporadas em betões permite a reutilização de agregados reciclados, mas também minimizar o consumo de energia durante o período de utilização do edifício. Este estudo tem como principal objetivo a avaliação da incorporação de material de mudança de fase (PCM) em agregado reciclado proveniente de RCD, utilizado em substituição do agregado natural para a produção de betões, assim como a avaliação do comportamento mecânico dos betões produzidos. A incorporação de PCM no agregado reciclado foi efetuada segundo duas técnicas distintas, a vácuo e a pressão atmosférica, sendo produzidos betões com os diferentes agregados. Foi possível verificar que a presença do agregado reciclado dopado com PCM afetou negativamente o desempenho mecânico das diferentes formulações de betão desenvolvidas.

ABSTRACT

The growth of urbanization has led to the rapid development of the construction industry, resulting in a large amount of construction and demolition waste (CDW) and, at the same time, an increase in energy consumption and carbon dioxide (CO₂) emissions into the atmosphere. The simultaneous application of CDW and latent heat technologies incorporated into concrete allows for the reuse of recycled aggregates while also minimizing energy consumption during the building's use period. The main objective of this study is to evaluate the incorporation of phase change material (PCM) in recycled aggregates from CDW, used to replace natural aggregates in concrete production, as well as to evaluate the mechanical behaviour of the produced concrete. The incorporation of PCM in recycled aggregates was carried out using two different techniques, vacuum and atmospheric pressure, and concrete was produced with the different aggregates. It was possible to verify that the presence of recycled aggregate doped with PCM negatively affected the mechanical performance of the different developed concrete formulations.

Palavras-chave:

Betão térmico, Resíduos de construção e demolição, Material de Mudança de Fase, resistência à compressão.

Keywords:

Thermal concrete, construction and demolition waste, phase change materials, compressive strength.

1. Introdução

O rápido crescimento da população mundial e o desenvolvimento das urbanizações levaram ao rápido desenvolvimento da indústria da construção, originando também uma grande quantidade de resíduos de construção e demolição (RCD). A produção mundial de resíduos sólidos tem vindo a aumentar significativamente, passando de uma quantidade inferior a 0.3 milhões de toneladas (Mt.) por dia em 1900, para mais de 3.5 Mt. por dia em 2010, prevendo-se ainda que possa vir a duplicar em 2025 e a triplicar em 2100 [1]. O simples tratamento em aterro sanitário dos RCD tem causado uma elevada poluição ambiental e danos ecológicos, de modo que o tratamento racional e a reutilização de recursos de RCD tornaram-se um tema importante para a indústria da construção e para a comunidade científica. Até ao momento, a Europa, os Estados Unidos da América, o Japão e a Coreia do Sul possuem uma política de gestão e reutilização de recursos relativos aos RCD já implementada [2]. Contudo, países em desenvolvimento como a China e a Índia ainda apresentam uma taxa de utilização destes resíduos muito baixa, sendo de 5% a 10% [3] e de 1% [4], respetivamente.

As estatísticas da equipa do investigador Chen [5] e da equipe do Banco Mundial [6], reportaram um rápido desenvolvimento da urbanização global, especialmente no que diz respeito à taxa de urbanização da China que aumentou de cerca de 18% em 1978 para 64% em 2020 e também nos Estados Unidos da América e na União Europeia cuja taxa de urbanização é cerca de 83% e 75% em 2020, respetivamente. Associado ao desenvolvimento da urbanização global encontra-se também o rápido desenvolvimento do setor de construção e em consequência uma elevada produção de resíduos de construção e demolição e consumos energéticos. A China, os Estados Unidos da América e a UE (União Europeia 28 países) têm vindo a apresentar a maior produção anual de RCD em todo mundo [7], no entanto, em 2018, a taxa de utilização desses recursos na China foi de apenas 10% [8], muito inferior aos 76% [9] e 90% [10] dos Estados Unidos da América e da UE. Por muito tempo, a China adotou métodos simples de acumulação e disposição em aterros de RCD, que levaram à ocupação de muito espaço e desperdiçaram muitos recursos, destruindo também o meio ambiente. Diante desta problemática, como tratar e regenerar de forma abrangente os RCD, este tornou-se um assunto de elevado interesse e importância no sector de construção. Segundo Elshaboury et al. [11], de 2001 a 2021, um total de 895 artigos académicos foram publicados sobre RCD, e seu campo de aplicação envolveu estradas, tijolo/bloco, betão, argamassa, etc. Vários trabalhos têm sido desenvolvidos reutilizando RCD como agregado em betão [12, 13, 14, 15, 16, 17]. Zheng et al. [18] desenvolveram um estudo no qual efetuaram a substituição de agregado natural nos teores de 0, 25, 50, 75 e 100% por agregado de betão reciclado e agregado de tijolo reciclado, com tamanho de partícula compreendido entre 4 a 32.5 mm em betão C25, com a relação de água/ligante de 0.55 e betão C50, com a relação de água/ligante de 0.35. Os resultados obtidos permitiram observar que o aumento do teor de agregado reciclado originou uma diminuição na resistência do betão.

Por outro lado, os consumos energéticos são cada vez mais significativos, as fontes de energia não renováveis, como o petróleo e o gás natural, estão cada vez mais esgotadas e a crise energética é cada vez mais grave [19]. Tendo, também sido recentemente agravada pelos graves conflitos internacionais, sem precedentes, a que temos assistido. Tyagi [20] apontou que os sistemas de aquecimento e arrefecimento dos edifícios consomem 40% de energia, enquanto produzem uma grande quantidade de emissões de carbono. A Agência Internacional de Energia (IEA) [21] informou que o consumo total de energia para aquecimento, arrefecimento e produção de água quente nos edifícios em todo o mundo em 2017 foi de cerca de 10^{15} kJ, representando cerca de 20% do consumo global de energia. A maior contribuição para o consumo mundial de energia em edifícios são as economias emergentes como a China, o Brasil, a Índia entre outros países. Entre eles, de acordo com as estatísticas do Comitê de Estatísticas de Consumo de Energia da Associação de Conservação de Energia de Edifícios da China [22], o consumo nacional de energia na fase de operação dos edifícios em 2018 foi de 2.93×10^{16} kJ, cerca de 21.7% do consumo nacional de energia, e as emissões de dióxido de carbono foram de 2.1 bilhões de toneladas, correspondendo a cerca de 22% do total das emissões do país. Desta forma, verifica-se também a necessidade de atuar nesta problemática do setor da construção, através da utilização de materiais funcionais, tais como os materiais de mudança de fase (PCM). O PCM é um material

baseado em energia verde [23]. Embora não possa gerar nenhuma forma de energia por si só, este pode usar o seu efeito térmico de mudança de fase para armazenar o calor perdido no ambiente externo na forma de calor latente e, liberar e utilizar a energia em condições adequadas para melhorar a eficiência energética dos edifícios [24, 25], substituindo em parte o recurso a combustíveis fósseis. Estes materiais podem ser utilizados como meio de armazenamento térmico para aquecimento solar passivo [25], podendo ser incorporados em argamassas [29, 30], placas de gesso cartonado [31, 32], betão [30, 31, 32], ou em tijolos e blocos [35, 36]. Portanto, a investigação e desenvolvimento de novos materiais de construção com capacidade de armazenamento de energia tem vindo a tornar-se numa questão de extrema importância para a comunidade científica, tendo como base a utilização eficiente de várias fontes de energia [19, 20], de modo a aliviar efetivamente a pressão causada pela perda de recursos provenientes de fontes não renováveis e a degradação ambiental.

O principal objetivo deste trabalho consistiu em combinar a tecnologia de calor latente e os RCD para preparar um betão térmico, avaliando-se a influência no estado fresco e endurecido dos betões, dos diferentes métodos de incorporação de PCM nos RCD. Assim, foram desenvolvidas várias formulações de betão com incorporação de diferentes teores RCD dopados com PCM. A incorporação de PCM nos RCD foi realizada com base em duas técnicas distintas, sendo estas a pressão atmosférica e o vácuo.

2. Procedimento Experimental

2.1. Matérias-primas

Neste trabalho foram utilizados agregados de origem natural (Areia e Brita) e agregado proveniente de resíduos de construção e demolição.

Os RCD (Figura 1) foram fornecidos pela empresa Resíduos de Construção e Demolição de Portugal, com dimensões entre 0 a 10 mm. De forma a se substituir a Brita de origem natural, o RCD foi peneirado de modo a separar as partículas com dimensões compreendidas entre 4 e 10 mm, (Figura 2). A massa volúmica das partículas secas e absorção de água do RCD foram determinados experimentalmente de acordo com a norma NP 581 [37], tendo-se obtido uma massa volúmica de 2134 kg/m³ e uma absorção de água de 7.82%. A massa volúmica e absorção de água foram determinadas de acordo a mesma norma, sendo 2197 kg/m³ e uma absorção de água de 0.51%, respetivamente. A areia do rio utilizada apresentou dimensões compreendidas entre 0-4 mm, de acordo com a norma NP 954 [38], a massa volúmica e absorção de água da areia do rio foram determinadas, sendo de 2563 kg/m³ e de 1.19%, respetivamente.

O PCM selecionado foi uma parafina pura (PCM-PP) com temperatura de transição de cerca de 22 °C, comercialmente designada de RT22HC, proveniente da empresa RUBITHERM®, sediada na Alemanha. A Tabela 1 apresenta as principais características do material de mudança de fase. Foi medida a expansão volumétrica que o PCM-PP apresenta durante a mudança de fase, tendo-se verificado que esta representa 2.7%, o que não é suficiente para causar danos significativos ao agregado reciclado proveniente dos RCD.

O cimento selecionado é um CEM I 42.5R, com uma massa volúmica de 3120 kg/m³.



Figura 1 - Resíduos de construção e demolição (RCD).

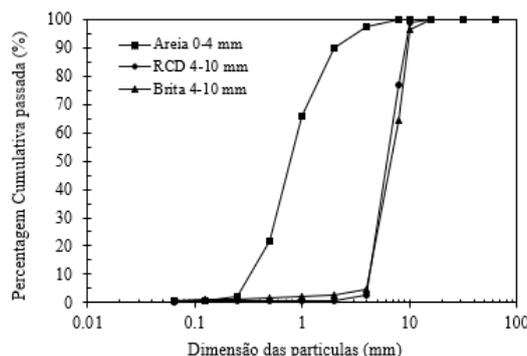


Figura 2 - Curva granulométrica dos agregados.

Tabela 1 - Os parâmetros deste PP (dados da empresa RUBITHERM®).

Características	Resultados
Temperatura de fusão	20-23 (°C)
Temperatura de solidificação	23-22 (°C)
Capacidade de armazenamento de calor	190 (kJ/kg)
Capacidade de calor específico	2 (kJ/kg·k)
Massa volúmica no estado sólido (20 °C)	0.76 (kg/L)
Massa volúmica no estado líquido (50 °C)	0.7 (kg/L)
Condutividade térmica	0.2 (W/(m·k))
Ponto de inflamação	>150 (°C)
Temperatura máxima de operação	50 (°C)

2.2. Funcionalização do agregado de RCD com PCM-PP

A absorção de PCM-PP pelo RCD foi realizada segundo dois métodos distintos, sendo estes, absorção à pressão atmosférica (Figura 3 a) e absorção a vácuo (Figura 3 b)). De forma a garantir uma correta absorção de PCM-PP pelo RCD, foi necessário garantir que o material de mudança de fase se encontra no estado líquido, pelo que este foi colocado numa estufa a uma temperatura de 35°C, durante 30 minutos anteriores à sua utilização. A temperatura selecionada para o acondicionamento do material teve em conta a temperatura de fusão do PCM-PP (22°C), de forma a garantir que todo o material se encontra no estado líquido. Para a técnica de absorção por imersão utilizando vácuo, o equipamento de contenção dos materiais foi também colocado no interior da estufa a 35°C, de forma a minimizar qualquer possibilidade do material de mudança de fase poder inicializar o seu processo de solidificação durante a funcionalização do agregado de RCD.



(a) Sem vácuo



(b) Com vácuo

Figura 3 - Absorção de PCM-PP pelo RCD.

De forma a garantir a máxima absorção de PCM-PP pelo RCD com dimensões de 4-10 mm, o material foi seco previamente em estufa a 105 °C durante 24 horas, eliminando a existência

de qualquer humidade, sendo posteriormente realizada a absorção do PCM-PP em ambiente controlado. Relativamente à absorção do PCM-PP pelo agregado reciclado por imersão a pressão atmosférica, as partículas de RCD foram imersas diretamente num recipiente com PCM líquido durante uma hora ou 4 horas. No caso da absorção de PCM-PP por imersão a vácuo, as partículas de RCD foram inicialmente colocadas em vácuo, retirando todo o ar existente na amostra durante 3 horas. Em seguida, o PCM foi introduzido com recurso a vácuo, sendo realizada uma amostra com introdução durante uma hora e uma segunda amostra com introdução de PCM a vácuo durante 4 horas, tal como realizada para a funcionalização do agregado à pressão atmosférica. A Figura 4 apresenta a absorção de PCM-PP pelo agregado reciclado, segundo os diferentes métodos e tempos de imersão.

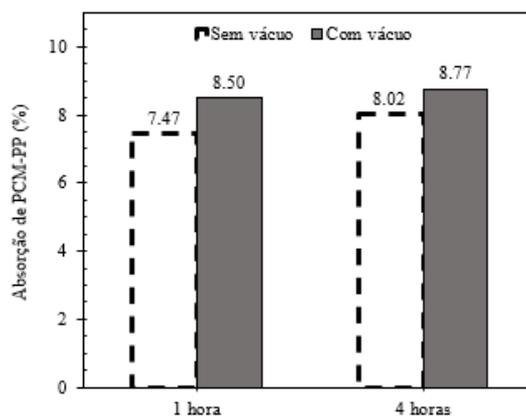


Figura 4 - Os resultados de absorção de PP do RCD.

Tal como se pode observar relativamente à imersão do agregado reciclado de RCD durante 1 hora em material de mudança de fase, a utilização de vácuo origina um aumento na absorção de PCM-PP de cerca de 14%, relativamente à absorção à pressão atmosférica. No que diz respeito à imersão do agregado em PCM-PP durante 4 horas a utilização de vácuo origina um aumento na absorção de cerca de 9%, em relação à absorção à pressão atmosférica. Efetuando uma comparação no que diz respeito ao tempo de imersão utilizado, pode ser observado que na utilização da absorção à pressão atmosférica a imersão durante 4 horas origina um aumento de cerca de 7% em comparação com 1 hora de imersão. Na técnica de absorção de PCM-PP a vácuo a imersão durante 4 horas originou um aumento na absorção de PCM-PP menos significativa, de apenas 3% comparando com uma hora.



Figura 5 - RCD aditivado com PP (RCD-PP) com vácuo durante 4 horas.

2.3. Composições

Foram desenvolvidas sete composições distintas de betão com diferentes teores de agregado reciclado, sendo que o agregado foi funcionalizado com PCM-PP através dois métodos descritos anteriormente. A relação de água/ligante utilizado foi de 0.55. O betão referência, apenas com

incorporação de agregado natural e sem a presença de PCM-PP (REF) foi desenvolvido pelo método de Faury, de modo a obter a maior compactidade e melhor trabalhabilidade [39]. Foram ainda desenvolvidas duas composições com agregado reciclado sem incorporação de PCM-PP, com percentagens de incorporação de 40% e 80% da massa de brita (40RCD e 80RCD), duas composições com incorporação de agregado reciclado ativado com PCM à pressão atmosférica (40RCD-PP S/V e 80RCD-PP S/V) e duas composições com incorporação de agregado reciclado aditivado com PCM sob vácuo (40RCD-PP C/V e 80RCD-PP C/V). A Tabela 2 apresenta as diferentes composições de betão desenvolvidas.

Tabela 2 - Dosagem do betão (kg/m³).

Misturas	Cimento	Água	Areia 0/4	Brita 4/10	RCD 4/10	RCD-PP	PP %
REF	400	230	393	1035	-	-	0 %
40RCD	400	230	393	621	414	-	0 %
80RCD	400	230	393	207	828	-	0 %
40RCD-PP S/V	400	230	393	621	-	440	1.2 %
40RCD-PP C/V	400	230	393	621	-	446	1.5 %
80RCD-PP S/V	400	230	393	207	-	880	2.5 %
80RCD-PP C/V	400	230	393	207	-	892	3.0 %

3. Resultados

3.1. Abaixamento

As classes do abaixamento do betão são divididas em cinco, como definidas na norma NP EN 206-1 2007 [40]. A Figura 6 (a) apresenta os resultados do ensaio de abaixamento das todas composições de betão desenvolvidos. A incorporação de RCD no betão origina uma diminuição no seu abaixamento, provocando também a diminuição de uma ou mais classes de abaixamento.

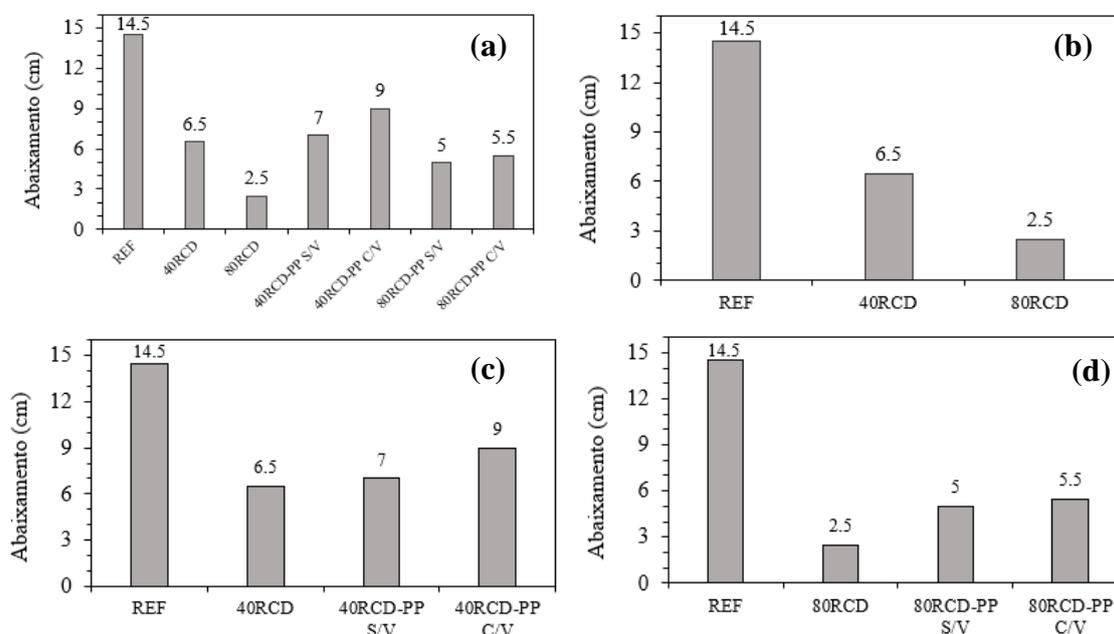


Figura 4 - Abaixamento dos diferentes betões desenvolvidos.

3.2. Resistência à compressão

A resistência à compressão foi realizada com base na norma EN 12390-3 [41]. Inicialmente foram moldados 5 provetes cilíndricos para cada composição de betão, com dimensões de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. Foram testados dois métodos de cura, 3 provetes foram colocados em câmara húmida durante 28 dias e 2 provetes foram colocados em câmara húmida durante 21 dias

e 7 dias em imersão em água. A figure 7 mostrou-se a resistência à compressão dos betões curados na sala húmida.

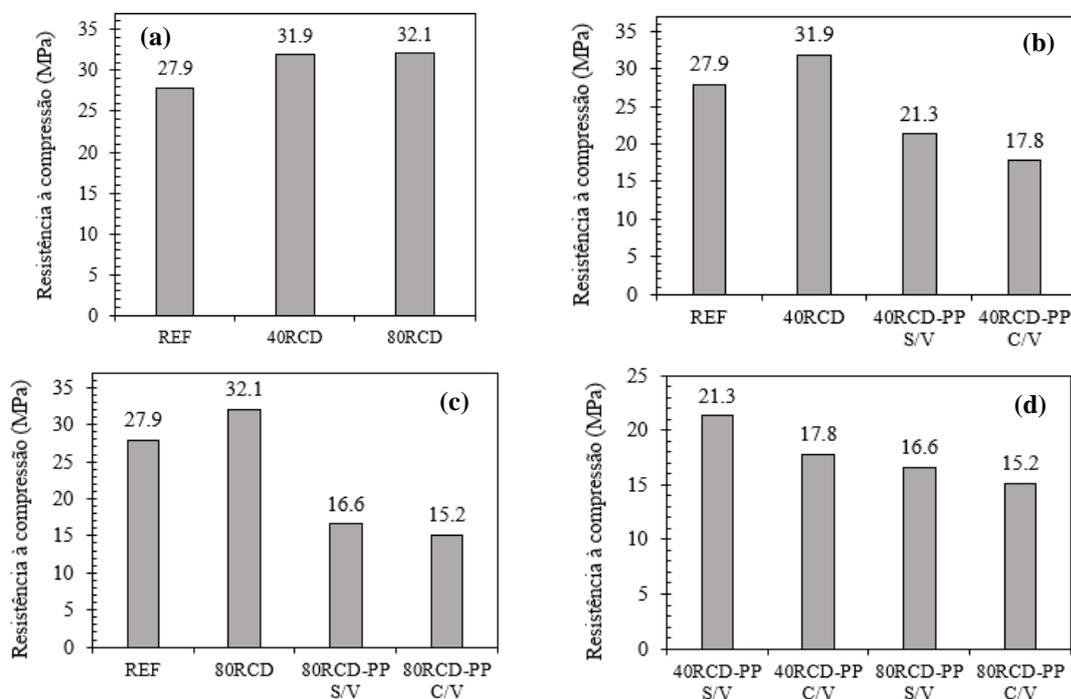


Figura 5 - Resistência à compressão dos betões curados na sala húmida.

A Figura 8 apresenta os resultados obtidos, independentemente do tipo de cura, sendo possível observar que os betões com incorporação de agregado reciclado sem incorporação de PCM-PP apresentam uma maior resistência comparativamente aos betões com incorporação de agregado reciclado funcionalizado com PCM-PP.

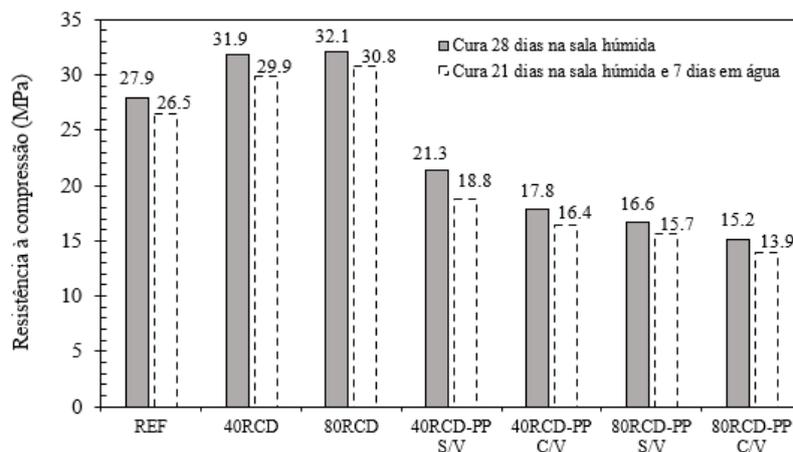


Figura 6 - Resistência à compressão dos todos betões desenvolvidos.

4. Discussão

4.1. Abaixamento

No que diz respeito à incorporação de agregado reciclado puro, ou seja, sem incorporação de PCM-PP (Figura 6 b)), verificou-se que a incorporação de 40% de agregado reciclado originou uma diminuição no abaixamento de cerca de 55% relativamente à composição de referência,

obtendo-se uma classe de abaixamento S2 (5-9 cm). Relativamente à incorporação de 80% de agregado reciclado puro verificou-se uma diminuição no abaixamento de cerca de 83%, tendo a classe de abaixamento caído 2 classes e apresentando-se como uma S1 (1-4 cm). Este comportamento pode ser justificado pela forma mais irregular e pelas pequenas partículas soltas na superfície características deste tipo de agregados.

Por outro lado, quando se efetua uma comparação com o betão com agregado reciclado puro (40RCD e 80RCD) e com agregado reciclado com incorporação de PCM por imersão à pressão atmosférica (40RCD-PP S/V e 80RCD-PP S/V) ou por vácuo (40RCD-PP C/V e 80RCD-PP C/V) (Figura 6 c) e 6 d)) foi possível verificar uma tendência para o aumento no abaixamento, originando até o aumento de uma classe de abaixamento em algumas situações. Todos os betões com incorporação de agregado reciclado com incorporação de PCM apresentam uma classe de abaixamento S2. Este comportamento pode ser justificado pelo facto que o RCD após ter sido embebido em PCM, a sua superfície fica limpa e parte da sua área fica coberta com PCM (Figura 5), o que reduz bastante o atrito entre os agregados, conseguindo-se assim este efeito de aumento do abaixamento.

Relativamente à composição com 40% de agregado reciclado (40RCD-PP S/V) e comparativamente à composição 40RCD este aumento foi de cerca de 8% e na composição com 80% de agregado reciclado (80RCD-PP S/V) comparativamente com a composição 80RCD este aumento foi de 100% (Figura 6 c) e 6d)). Por sua vez, os betões aditivados com agregado reciclado dopados com PCM por imersão a vácuo apresentam um aumento de cerca de 38% para o betão 40RCD-PP C/V comparativamente à composição 40RCD e de 120% para o betão 80RCD-PP C/V comparativamente à composição 80RCD.

Por último, efetuando uma análise comparativa entre as composições aditivadas com agregado reciclado aditivado com PCM por imersão a vácuo em relação às composições aditivadas com agregado reciclado aditivado com PCM por imersão à pressão atmosférica verificou-se que a técnica de vácuo conduziu a maiores valores de abaixamento, tendo o abaixamento aumentado cerca de 29% para as composições com 40% de agregado reciclado e cerca de 10% para as composições com cerca de 80% de agregado reciclado.

Neste trabalho, de todas as misturas de betões com agregado funcionalizado com PCM-pp, embora o betão 80RCD-PP C/V tenha incorporado a maior quantidade de PCM, o seu abaixamento ainda foi inferior o betão de 40RCD-PP S/V. Este comportamento pode ser explicado pela quantidade total de agregado reciclado incorporada ser o principal fator que afeta o abaixamento de betão fresco. No entanto, o agregado funcionalizado com PCM-PP apresenta vantagens óbvias na otimização do abaixamento do betão fresco com 80% de RCD (80RCD), o que pode aumentar o abaixamento.

4.2. Resistência à compressão

Comparativamente com o betão de referência foi possível observar (Figura 7 a)), que o betão com incorporação de 40% e 80% de agregado reciclado não funcionalizado (40RCD e 80RCD), apresentam um aumento na resistência à compressão superior a 13% e 15%, respetivamente e independentemente da cura.

No que diz respeito à incorporação de 40% de RCD, verificou-se uma diminuição da resistência à compressão do betão 40RCD-PP S/V superior a 33% com a incorporação do agregado reciclado funcionalizado com PCM-PP (Figura 7 b)). Este comportamento pode ser justificado pela dificuldade de ligação da matriz do betão aos agregados dopados com PCM-PP, uma vez que durante o processo de imersão parte do PCM-PP envolve a superfície externa do agregado. Na Figura 7 c), o mesmo comportamento foi identificado relativamente à incorporação de 80% de agregado reciclado funcionalizado (80RCD-PP S/V), tendo-se verificado uma diminuição da resistência à compressão superior a 48%. Este comportamento é justificado pela presença de um maior teor de PCM-PP presente no agregado, o que pode dificultar em maior escala a ligação da matriz cimentícia às partículas de agregado reciclado.

A Figura 7 b) e c), apresenta a resistência à compressão obtida com diferentes técnicas de incorporação PCM-PP. Foi possível observar uma diminuição da resistência à compressão em cerca de 16% e 8%, para uma incorporação de 40% e 80% de agregado reciclado funcionalizado

com PCM-PP, respetivamente. Estes resultados demonstram que o teor de incorporação de agregado reciclado de RCD funcionalizado com PCM-PP afeta negativamente a resistência à compressão do betão em qualquer das técnicas de incorporação de PCM-PP utilizadas (Figura 8 d)).

Na Figura 8, em todas as composições de betão analisadas verificou-se que na cura de betão com 21 dias em sala húmida e 7 dias imersos em água a resistência à compressão diminuiu em média cerca de 7% comparando com os betões curados 28 dias em sala húmida. O betão curado 28 dias em sala húmida apresentou a resistência à compressão prevista.

5. Conclusões

Este artigo considera a tentativa de combinar o reaproveitamento de resíduos de construção e demolição como substituto do agregado natural em betões, funcionalizando-os com o material de mudança de fase. Desta forma, são abordadas três das principais temáticas, que atualmente mais preocupam os técnicos da indústria da construção, sendo esta a gestão eficiente dos recursos naturais, a gestão dos resíduos de construção e demolição e aumento da eficiência energética dos edifícios. Contudo, a incorporação de agregado reciclado funcionalizado com PCM-PP não encapsulado em betões altera as suas principais propriedades, nomeadamente o abaixamento e a resistência à compressão.

Relativamente ao processo de funcionalização do agregado reciclado foi possível concluir que apresentaram uma boa taxa de absorção de material de mudança de fase e pouca variação volúmica, independentemente do método de incorporação utilizado (pressão atmosférica e vácuo).

No que diz respeito ao abaixamento verificado nos betões desenvolvidos, a incorporação de agregado reciclado originou uma diminuição do mesmo, provocando também a diminuição de uma ou mais classes de abaixamento. Sendo que este comportamento pode ser justificado pela forma mais irregular e pelas pequenas partículas soltas na superfície do agregado reciclado de RCD não funcionalizado e pelo facto da sua superfície do agregado funcionalizado com PCM-PP ficar coberta com PCM, reduzindo o atrito entre os agregados e os restantes constituintes do betão.

Por último, no que confere à resistência à compressão foi possível concluir os betões com incorporação de agregado reciclado funcionalizado com PCM-PP apresentam um menor desempenho, justificado pela maior dificuldade de ligação da matriz cimentícia às partículas de agregado reciclado com PCM.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT), no âmbito da bolsa de doutoramento com referência UI/BD/152844/2022.

Referências

- [1] G.A. Aguilar-Hernandez, S. Deetman, S. Merciai, J.F.D. Rodrigues, A. Tukker, Global distribution of material inflows to in-use stocks in 2011 and its implications for a circularity transition, *Journal of Industrial Ecology*. 25 (2021) 1447–1461. <https://doi.org/10.1111/jiec.13179>.
- [2] X. Zhao, R. Webber, P. Kalutara, W. Browne, J. Pienaar, Construction and demolition waste management in Australia: A mini-review, *Waste Management and Research*. 40 (2022) 34–46. <https://doi.org/10.1177/0734242X211029446>.
- [3] Y. Zhang, W. Tan, Demolition waste recycling in China: New evidence from a demolition project for highway development, *Waste Management and Research*. 38 (2020) 696–702. <https://doi.org/10.1177/0734242X20904440>.

- [4] The time of India, India recycles only 1% of construction and demolition waste, study finds, (2020) 2. <https://timesofindia.indiatimes.com/business/articleshowprint/77747060.cms>, (acesso em 10 setembro 2022).
- [5] X. Chen, C. Liu, X. Yu, Urbanization, Economic Development, and Ecological Environment: Evidence from Provincial Panel Data in China, *Sustainability (Switzerland)*. 14 (2022) 1–15. <https://doi.org/10.3390/su14031124>.
- [6] World bank group, Urban population (% of total population), The World Bank. (2020) 1. <https://data.worldbank.org/indicator/SP.URB.TOTL.IN.ZS?view=map>, (acesso em 13 setembro 2022).
- [7] C. Zhang, M. Hu, F. Di Maio, B. Sprecher, X. Yang, A. Tukker, An overview of the waste hierarchy framework for analyzing the circularity in construction and demolition waste management in Europe, *Science of the Total Environment*. 803 (2022) 13. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149892>.
- [8] B. Huang, X. Wang, H. Kua, Y. Geng, R. Bleischwitz, J. Ren, Construction and demolition waste management in China through the 3R principle, *Resources, Conservation and Recycling*. 129 (2018) 36–44. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.029>.
- [9] Construction and Demolition Debris: Material-Specific Data, United States Environmental Agency. (2021) 2. <https://www.epa.gov>, (acesso em 15 setembro 2022).
- [10] Recovery rate of construction and demolition waste, Statistics Eurostat. (2022) 1. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/cei_wm040/default/table?lang=en. (acesso em 15 setembro 2022).
- [11] N. Elshaboury, A. Al-sakkaf, E.M. Abdelkader, G. Alfalah, Construction and Demolition Waste Management Research : A Science Mapping Analysis, *Environmental Research and Public Health*. 19 (2022) 25. <https://doi.org/10.3390/ijerph19084496>.
- [12] M. Abed, R. Nemes, B.A. Tayeh, Properties of self-compacting high-strength concrete containing multiple use of recycled aggregate, *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*. 32 (2020) 108–114. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.125>.
- [13] B.S. Hamad, A.H. Dawi, Case Studies in Construction Materials Sustainable normal and high strength recycled aggregate concretes using crushed tested cylinders as coarse aggregates, *Case Studies in Construction Materials*. 7 (2020) 228–239. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.08.006>.
- [14] V.S. Babu, A.K. Mullick, K.K. Jain, P.K. Singh, Strength and durability characteristics of high- strength concrete with recycled aggregate- influence of processing, *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*. 4 (2015) 55–76. <http://dx.doi.org/10.1080/21650373.2014.976777>.
- [15] A.I. Tijani, J. Yang, S. Dirar, Enhancing the Performance of Recycled Aggregate Concrete with Microsilica, *International Journal of Structural and Civil Engineering Research*. 4 (2015) <http://dx.doi.org/7.10.18178/ijscer.4.4.347-353>.
- [16] A. Australian, E. Congress, Recycled Aggregate as Coarse Aggregate Replacement in Concrete Mixes, *ASEAN Australian Engineering Congress 2011*. (2011) 9. <http://dx.doi.org/10.18178/ijscer.4.4.347-353>.
- [17] S. Kou, C. Poon, H. Wan, Properties of concrete prepared with low-grade recycled aggregates C & D Waste, *Construction and Building Materials*. 36 (2012) 881–889. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.060>.
- [18] C. Zheng, C. Lou, G. Du, X. Li, Z. Liu, L. Li, Mechanical properties of recycled concrete with demolished waste concrete aggregate and clay brick aggregate, *Results in Physics*. 9 (2018) 6. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.04.061>.

- [19] P. Limei, Ma; Dan, Shi; Qingbin, Low-carbon transformation of China's energy in 2015—2050:renewable energy development and feasible path, *China Population,Resources and Environment*. 2 (2018) 8–18.
- [20] V. V. Tyagi, K. Chopra, B. Kalidasan, A. Chauhan, U. Stritih, S. Anand, A.K. Pandey, A. Sari, R. Kothari, Phase change material based advance solar thermal energy storage systems for building heating and cooling applications: A prospective research approach, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 47 (2021) 44. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101318>.
- [21] I. (CCEEE), China council for an energy-efficient economy, *Energy efficiency 2018*, Beijing, 2018. www.oecd.org/about/publishing/corrigenda.htm, (acesso em 16 setembro 2022).
- [22] China association of building energy efficiency, *China Building Energy Research Report 2020*, Xiamen, China, 2020.
- [23] Z. Li, Y. Lu, R. Huang, J. Chang, X. Yu, R. Jiang, X. Yu, A.P. Roskilly, Applications and technological challenges for heat recovery, storage and utilisation with latent thermal energy storage, *Applied Energy*. 283 (2021) 23. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116277>.
- [24] P.K.S. Rathore, N.K. Gupta, D. Yadav, S.K. Shukla, S. Kaul, Thermal performance of the building envelope integrated with phase change material for thermal energy storage: an updated review, *Sustainable Cities and Society*. 79 (2022) 28. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103690>.
- [25] A.M. Matos, J.M.P.Q. Delgado, A.S. Guimarães, Energy-Efficiency Passive Strategies for Mediterranean Climate: An Overview, *Energies*. 15 (2022) 20. <https://doi.org/10.3390/en15072572>.
- [26] P.K.S. Rathore, S.K. Shukla, Enhanced thermophysical properties of organic PCM through shape stabilization for thermal energy storage in buildings: A state of the art review, *Energy and Buildings*. 236 (2021) 29. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110799>.
- [27] J. Yan, Study on thermal management system of power battery based on phase change heat dissipation, (2017) 160. <https://wap.cnki.net/touch/web/10358-1017073532.nh.html>, (acesso em 5 setembro 2022).
- [28] Athienitis A.; Liu C.; Hawes D.; Banu D.; Feldman D., Investigation of the Thermal Performance of a Passive Solar Test-Room with Wall Latent Heat Storage, *Athienitis A, Liu C, Hawes D, Banu D, Feldman D*. 32 (1997) 405–410. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(97\)00009-7](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(97)00009-7).
- [29] L. Shilei, Z. Neng, F. Guohui, Impact of phase change wall room on indoor thermal environment in winter, *Energy and Buildings*. 38 (2006) 18–24.
- [30] K. Cellat, B. Beyhan, B. Kazanci, Y. Konuklu, H. Paksoy, Direct Incorporation of Butyl Stearate as Phase Change Material into Concrete for Energy Saving in Buildings, *Journal of Clean Energy Technologies*. 5 (2017) 64–68. <https://doi.org/10.18178/jocet.2017.5.1.345>.
- [31] L.F. Cabeza, C. Castellón, M. Nogués, M. Medrano, R. Leppers, O. Zubillaga, Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings, *Energy and Buildings*. 39 (2007) 113–119. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.03.030>.
- [32] M. Bahrar, Z.I. Djamai, M. EL Mankibi, A. Si Larbi, M. Salvia, Numerical and experimental study on the use of microencapsulated phase change materials (PCMs) in textile reinforced concrete panels for energy storage, *Sustainable Cities and Society*. 41 (2018) 455–468. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.06.014>.
- [33] A. Castell, I. Martorell, M. Medrano, G. Pérez, L.F. Cabeza, Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling, *Energy and Buildings*. 42 (2010) 534–540. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.10.022>.

- [34] R. Saxena, D. Rakshit, S.C. Kaushik, Phase change material (PCM) incorporated bricks for energy conservation in composite climate: A sustainable building solution, *Solar Energy*. 183 (2019) 276–284. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.03.035>.
- [35] K. Faraj, M. Khaled, J. Faraj, F. Hachem, C. Castelain, Phase change material thermal energy storage systems for cooling applications in buildings: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 119 (2020) 109579. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109579>.
- [36] N. Kumar, S.K. Gupta, V.K. Sharma, Application of phase change material for thermal energy storage: An overview of recent advances, *Materials Today: Proceedings*. 44 (2021) 368–375. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.745>.
- [37] Norma Portuguesa Definitiva (NP), NP-581, Determinação das massas volúmicas e da absorção de água de brita e godos, 1969.
- [38] Norma Portuguesa Definitiva (NP), NP-954, Determinação das massas volúmicas e da absorção de água de areias, 1973.
- [39] J. Figueroa, M. Fuentealba, R. Ponce, M. Zúiga, Effects on the Compressive Strength and Thermal Conductivity of Mass Concrete by the Replacement of Fine Aggregate by Mussel Shell Particulate, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 503 (2020) 11. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/503/1/012070>.
- [40] European Committee for Standardization (CEN), EN 206-1, Concrete - Part 1: Specification, performance, production e conformity, Concrete, 2007.
- [41] European Committee for Standardization (CEN), EN-12390-3, Hardened concrete tests, Part 3: Compressive strength of test specimens, 2003.

ORCID

Zhiyou Jia	0000-0002-5402-0600 (https://orcid.org/0000-0002-5402-0600)
Sandra Raquel Leite da Cunha	0000-0002-6384-1355 (https://orcid.org/0000-0002-6384-1355)
José Luís Barroso de Aguiar	0000-0003-3954-5721 (https://orcid.org/0000-0003-3954-5721)

Impacto de estratégias de aquecimento nos sistemas de construção LSF: avaliação do conforto térmico e desempenho energético

Impact of heating strategies in LSF building systems: evaluation of thermal comfort and energy performance

R.M.S.F. Almeida^{a†}, R. Vicente^b, A. Figueiredo^b, M. Figueiredo^b

^a *CONSTRUCT, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias, s/n; 4200-465 Porto, Portugal*

^b *RISCO, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Campus Universitário de Santiago 3810-193 Aveiro*

[†] *ralmeida@estgv.ipv.pt*

RESUMO

A importância de compatibilizar um bom desempenho térmico com uma elevada eficiência energética é um desafio relevante e atual nos edifícios residenciais. Nos países do sul da Europa, o recurso aos sistemas de aquecimento é, muitas vezes, condicionado, por um fenómeno designado por pobreza energética. Neste contexto, o desafio de procurar soluções construtivas sustentáveis, que otimizem o desempenho térmico dos edifícios, é ainda mais premente.

O sistema construtivo em aço enformado a frio, *Light Steel Framing* (LSF), tem vindo a ocupar uma posição mais relevante no mercado e de forma crescente. No entanto, a utilização destes sistemas é ainda questionada devido à sua fraca inércia térmica. Este estudo pretende contribuir para a compreensão do comportamento térmico e do desempenho energético de edifícios em LSF localizados em climas mediterrâneos. Para apoiar este trabalho, utilizam-se duas células de teste, uma composta por materiais tradicionais (construção em betão armado e alvenaria) e uma segunda composta por construção em aço enformado a frio. Foi comparado o desempenho das duas células de teste no período de inverno, considerando-se diferentes estratégias de aquecimento (contínuo e intermitente), procurando-se assim analisar os hábitos reais de aquecimento da população, neste caso de estudo, portuguesa. A monitorização inclui a medição da temperatura do ar interior e do consumo de energia para aquecimento.

Na sequência deste trabalho, pretende-se contribuir para uma melhor compreensão do desempenho térmico e energético dos edifícios em aço enformado a frio quando comparados com edifícios de construção tradicional, bem como na capacidade destes de proporcionarem um ambiente confortável de forma mais económica e mais sustentável.

ABSTRACT

The importance of simultaneously good thermal performance and high energy efficiency is a relevant and current challenge in residential buildings. In southern European countries, the use of heating systems is often limited by a phenomenon called energy poverty. In this context, the challenge of aspiring sustainable constructive solutions, which optimise the thermal performance of buildings, is even more urgent.

The constructive system in Light Steel Framing (LSF) has been occupying a more relevant position in the market and with a growth path. However, the use of these systems still needs to be studied due to their low thermal inertia. This study aims to increase the current knowledge regarding the thermal behaviour and energy

Palavras-chave:

Estruturas de aço leve; Campanha experimental; Inércia térmica; Estratégias de aquecimento; Conforto térmico; Desempenho energético.

Keywords:

Light steel framing; Experimental campaign; Thermal inertia; Heating strategies; Thermal comfort; Energy performance.

performance of LSF buildings in Mediterranean climates. Thus, two test cells are tested, one composed of traditional solutions (reinforced concrete and masonry construction) and the second consisting of cold-formed steel construction. The performance of the two test cells was compared in the winter period, considering different heating strategies (continuous and intermittent), to analyse some patterns of the user's heating habits, in this case, regarding the Portuguese population. The monitoring includes measuring indoor air temperature and energy consumption for heating the space.

This research work intends to contribute to a better understanding of the thermal and energy performance of light steel framing buildings when compared with traditional construction buildings and their ability to provide a comfortable environment more economically and sustainably.

1. Introdução

Segundo a Organização Mundial de Saúde, a população das sociedades modernas passa aproximadamente 90% do seu tempo no interior dos edifícios, sendo que 2/3 desse tempo é passado na própria habitação [1]. Adicionalmente, os edifícios residenciais ganharam igualmente novos requisitos que têm vindo progressivamente a evoluir, não apenas como locais de habitação, mas também como zonas de trabalho profissional.

O sector residencial é responsável por uma parte muito significativa do consumo energético na União Europeia (UE), tendo este sector representado aproximadamente 27% do total do consumo de energia em 2020. Salienta-se que desse consumo, 62.8% destina-se a colmatar as necessidades de aquecimento das habitações [2]. Estas percentagens justificam a crescente consciencialização sobre a importância de encontrar novas soluções construtivas sustentáveis, que satisfaçam as necessidades de conforto, promovendo a eficiência energética dos edifícios.

Nos países do sul da Europa, pela sua especificidade climática (verões secos e invernos amenos e húmidos), contexto económico (rendimentos baixos e elevado custo energético) e cultural (hábitos e comportamentos) [3], a prática de aquecimento contínuo não é recorrente, sendo o aquecimento intermitente a prática mais comum dentro das habitações residenciais. Desta forma, é importante entender-se a influência e eficiência dessas práticas em diferentes tipologias construtivas, nomeadamente comparando o desempenho térmico e energético da construção corrente em betão armado e alvenaria, com as soluções designadas de construção ligeira ou leve, que emergem no setor dos edifícios.

O uso de materiais e componentes de construção pesados com capacidade de armazenamento de calor, tais como betão armado e alvenaria, conduzem a soluções com uma forte inércia térmica, soluções essas que há muito estão presentes no edificado residencial do sul da Europa [4]. Este hábito construtivo nasce da necessidade de manter as habitações com uma reduzida amplitude térmica. Sendo os países do sul da Europa caracterizado por variações de temperatura diária e sazonal consideráveis, estes sistemas construtivos tendencialmente apresentarão um melhor desempenho. Por outras palavras, a forte inércia térmica destas construções permite uma temperatura interior mais estável, sem utilização de fontes de aquecimento ou arrefecimento, resultando num maior conforto térmico interior.

No entanto, o setor dos edifícios tem vindo a passar por uma mudança de paradigma, face ao surgimento de novas tecnologias construtivas. Assim, alternativas mais industrializadas e ligeiras têm ganho quota no mercado da indústria da construção, mostrando abordagens diferentes para satisfazer as necessidades humanas (sociais, económicas e culturais). O sistema construtivo de perfis em aço enformado a frio, tipicamente designado como *Light Steel Framing*, é um bom exemplo que tem vindo a ganhar notoriedade na indústria da construção, mostrando que consegue oferecer vantagens em relação ao sistema construtivo convencional [5].

Motivado pelo crescimento das soluções em aço enformado a frio nos países do sul da Europa, este trabalho pretende discutir as oportunidades e limitações deste sistema construtivo em termos de desempenho térmico e energético, tendo em conta diferentes estratégias de aquecimento (aquecimento contínuo e/ou intermitente). Assim, é avaliada a influência do padrão

de aquecimento, intermitente ou contínuo, através de uma campanha de monitorização de condições ambientais interiores e consumo energético em duas células de teste. O período de monitorização decorreu durante a estação de aquecimento, sendo uma célula representativa da construção corrente em betão e alvenaria (designada de HBM) e a outra representativa da construção leve em aço enformado a frio (designada de LSF).

2. Metodologia

2.1. Células de teste

As células de teste localizam-se em Albergaria-a-Velha, no distrito de Aveiro (região centro litoral de Portugal, com latitude 40°41'22.70"N, longitude 8°31'2.49"W, e 113 m de elevação). Esta região, segundo a classificação de Köppen-Geiger [6], é caracterizada por um verão quente, pertencendo ao grupo Csb.

As células de teste encontram orientadas pelo seu lado de maior dimensão, com uma direção aproximada à linha norte-sul (155° SE). Não existem elementos de sombreamento a sul e poente que possam implicar perturbações ou incertezas nos resultados, existindo um alinhamento de árvores na zona norte às mesmas. Adicionalmente, a implementação das células de teste foi projetada de modo a não existir sombreamento de uma sobre a outra. A Figura 1 apresenta a implantação das células de teste através de imagem satélite e apresenta também uma fotografia com vista principal do alçado orientado a sul das mesmas.



Figura 1 – Implantação das células de teste: a) Imagem satélite; b) Fotografia das células de teste.

A geometria das células de teste é regular, com dimensões internas em planta de 3,86 m por 2,97 m, resultando numa área de piso de aproximadamente 11,5 m². O pé-direito é de 2,7 m, resultando num volume interno de aproximadamente 31,0 m³. Para a definição do vão envidraçado foi realizada uma análise de sensibilidade com recurso ao programa DesignBuilder, tendo-se selecionado uma janela com 1,50 m², localizada no alçado sul.

Em termos construtivos, a célula à esquerda na Figura 1b) corresponde à solução em aço enformado a frio, enquanto a célula à direita corresponde à solução em betão armado e alvenaria, de modo a estabelecer uma referência para efeitos de comparação de desempenhos. As soluções adotadas para a cobertura e para as paredes exteriores apresentam o mesmo coeficiente de transmissão térmica nos dois sistemas construtivos, permitindo assim, a comparação direta do seu desempenho térmico. A caracterização construtiva detalhada das células de teste pode ser consultada em [7].

2.2. Monitorização

Para se caracterizar o comportamento térmico e o desempenho energético das duas células de teste, foi utilizado um conjunto de sensores para medir a temperatura e a humidade relativa (quatro sensores distribuídos junto ao pavimento e dois ao nível do teto, em cada uma das células de teste). Os sensores utilizados apresentam uma precisão de $\pm 0,2$ °C e $\pm 2,0$ %, para a medição da temperatura e da humidade relativa, respetivamente.

Em cada célula de teste está ainda instalado um sensor de temperatura junto ao centro

geométrico, que funciona como referência para o setpoint do sistema aquecimento. O setpoint estabelecido é de 18,0 °C, tendo o mesmo um intervalo de acionamento de 0,5 °C, o que significa que o sistema liga quando a temperatura do ar interior desce abaixo dos 17,5 °C, e desliga quando a temperatura atinge os 18,5 °C (dentro do horário definido para o período de aquecimento). O consumo de energia para aquecimento é monitorizado através de um medidor de consumo elétrico com funcionamento de data logger. O clima exterior foi monitorizado através de sensores termo higrômetros e de um piranômetro. A Figura 2 apresenta uma representação esquemática da instrumentação.

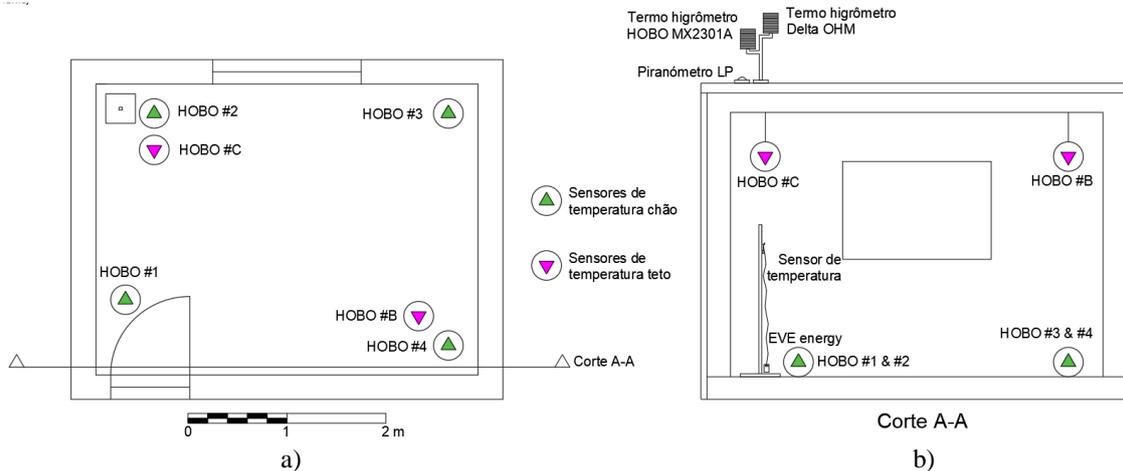


Figura 2 – Distribuição da instrumentação na célula de teste: a) Vista em planta; b) Vista em corte.

2.3. Ganhos internos

O efeito dos ganhos internos foi simulado considerando-se as recomendações da norma ISO 13790 [8], que, em contexto de edifícios residenciais, refere três períodos de ganhos internos num ciclo diário: das 23h às 7h, com um ganho de 2 W/m²; das 7h às 17h, com um ganho de 8 W/m²; e das 17h às 23h, com um ganho de 20 W/m². Aplicando esta recomendação à dimensão das células de teste (11,5 m²), resulta num ganho de calor de 23 W, 92 W e 230 W, para cada um dos períodos referidos. Este efeito foi considerado através de lâmpadas de aquecimento, que por disponibilidade de potências de lâmpadas comerciais, ajustaram-se estes valores, resultando assim o perfil de ganhos internos representado na Figura 3.

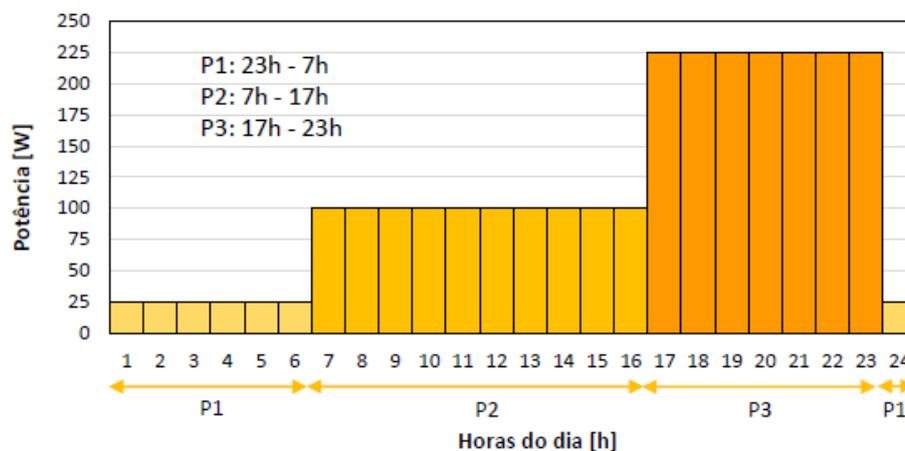


Figura 3 – Perfil dos ganhos internos.

2.4. Perfis de aquecimento

Para o aquecimento das células de teste foram instaladas no seu interior cinco lâmpadas de aquecimento (1 x 25 W, 1 x 75 W, 1 x 150 W e 2 x 200 W), perfazendo uma potência máxima de 650 W. Para avaliar a influência do padrão de aquecimento, foram definidos quatro perfis de aquecimento: perfil A, aquecimento das 20 às 23h; perfil B, aquecimento das 17 às 23h; perfil C, aquecimento das 17 às 7h; e perfil D, aquecimento contínuo (Figura 4). Os perfis foram consecutivamente aplicados ao longo de sete dias, tendo-se repetido o ciclo três vezes. A duração total do ensaio foi de aproximadamente quatro meses.

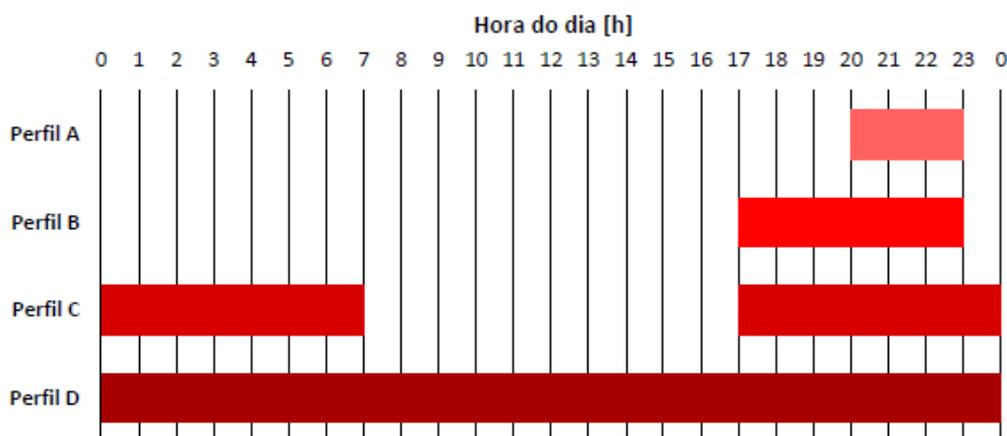


Figura 4 – Perfis de aquecimento.

3. Resultados

3.1. Temperatura exterior

As temperaturas do ar exterior registadas durante o período de medição estão sintetizadas na Figura 5, separadamente para cada mês.

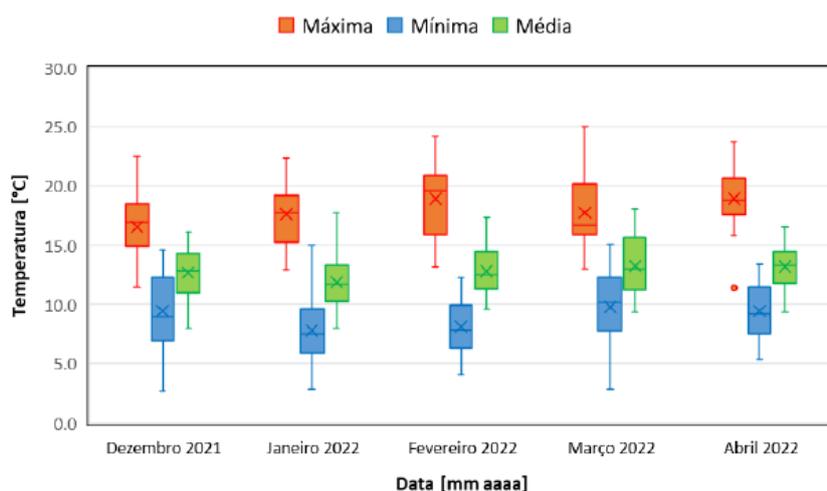


Figura 5 – Temperatura exterior máxima, mínima e média para o período de estudo.

Dos resultados é possível concluir que, durante o período de ensaio, a temperatura exterior foi particularmente amena, com poucos períodos de temperaturas baixas, resultando em reduzidas necessidades de aquecimento das células de teste. Registaram-se vários períodos em que a temperatura exterior foi superior à temperatura interior estabelecida como *setpoint* do sistema de aquecimento.

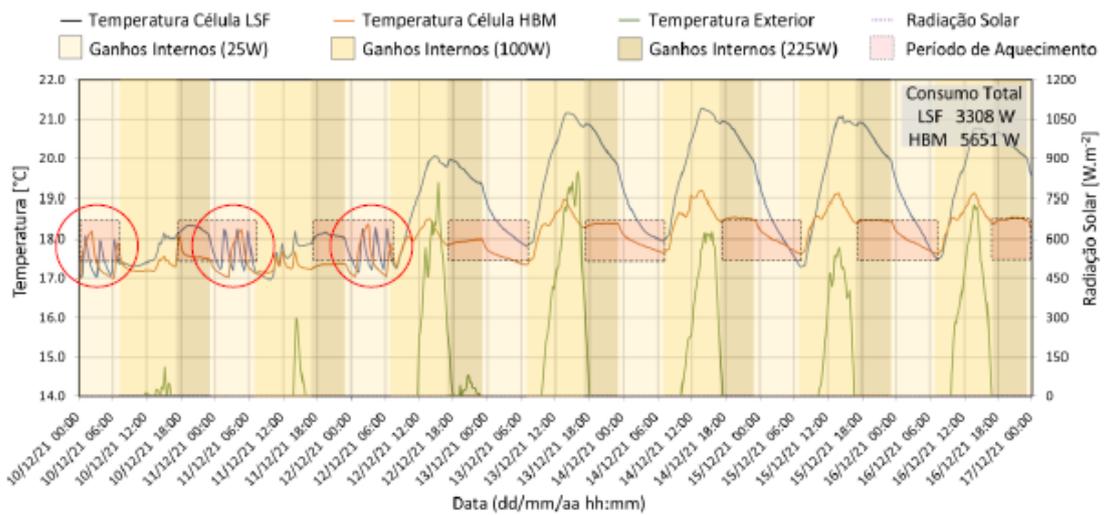
3.2. Temperatura interior e consumo de energia

A título de exemplo, a Figura 6 apresenta detalhadamente os resultados obtidos em três semanas de ensaio com o perfil de aquecimento C (17h-7h). Nessa figura representam-se as variações da temperatura do ar no interior das duas células de teste (LSF e HBM), os registos da temperatura do ar exterior e da radiação solar, bem como a indicação dos períodos em que são considerados os ganhos internos e os períodos em que funcionou o sistema de aquecimento.

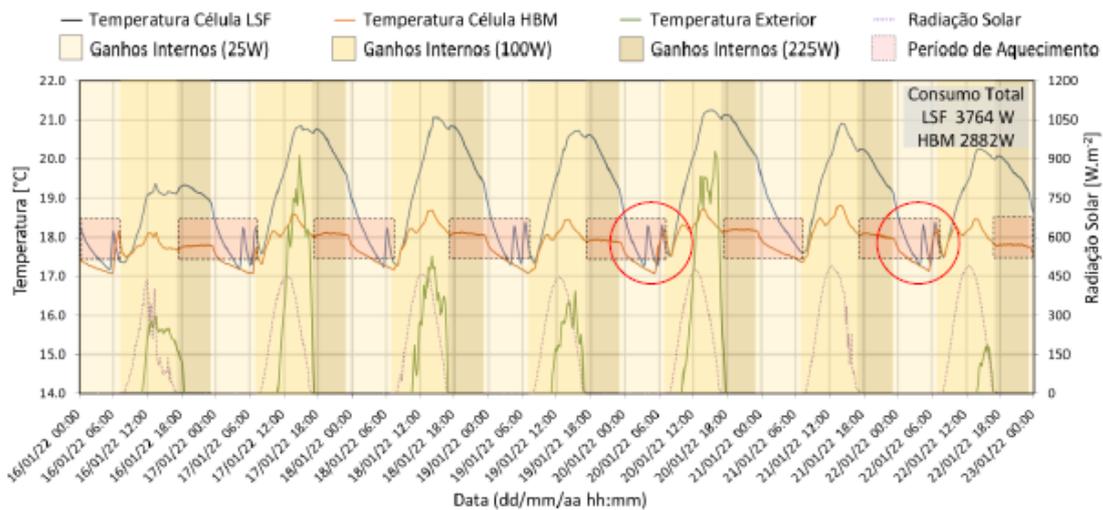
Nos três primeiros dias da segunda semana de ensaios (Figura 6a)), é possível observar que na célula de teste HBM o sistema de aquecimento apenas iniciou uma vez, enquanto na célula de teste em LSF arrancou três vezes (nº de picos no registo da temperatura). No entanto, a célula de HBM necessitou de mais tempo para atingir o valor de temperatura interior desejado, levando a um maior consumo energético face à célula de LSF, que atingiu mais rapidamente a temperatura desejada.

Na Figura 6b) é possível observar ocorrências semelhantes, com mais arranques do sistema na célula em LSF. Refira-se ainda, que a célula de HBM conseguiu manter uma temperatura interior confortável durante a maioria do período de aquecimento, ligando o aquecimento apenas no final do mesmo, resultando assim numa diminuição do consumo energético. No acumulado dessa semana, a célula em LSF apresentou um consumo mais elevado do a célula HBM, ao contrário do que havia sucedido na primeira semana de ensaio.

Assim, realizou-se mais uma semana de medição (Figura 6c)). No entanto, o clima exterior foi bastante temperado, resultando num consumo de energia muito residual em ambas as células de teste.



a)



b)

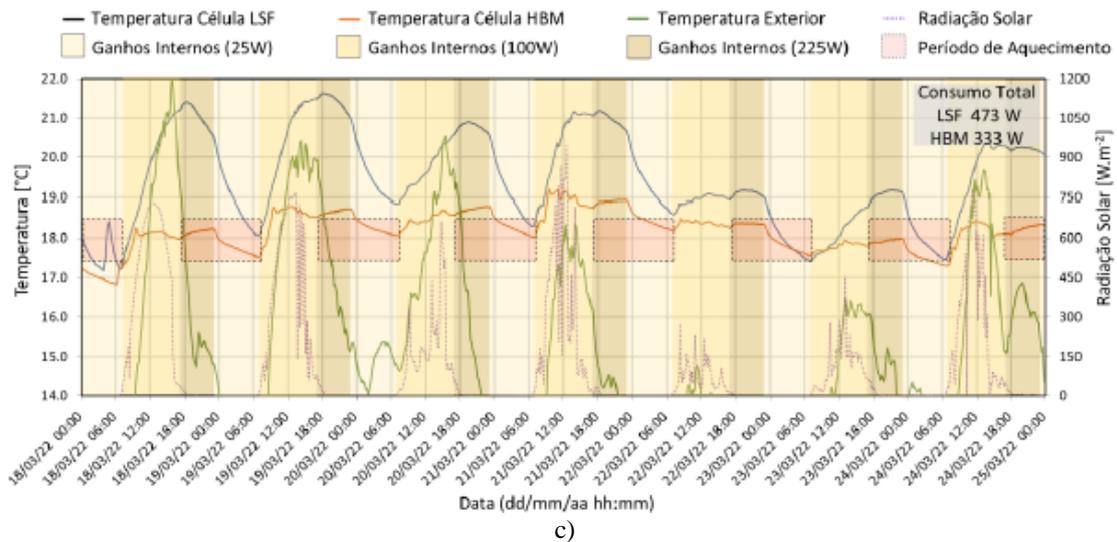


Figura 6 – Temperatura do ar no interior nas células de teste e condições ambientais externas durante uma semana com perfil de aquecimento C: a) PA#C_2ªsem (17-7h); b) PA#C_6ªsem (17-7h); c) PA#C_14ªsem (17-7h).

3.3. Síntese

A Figura 7 mostra todos os resultados obtidos durante as semanas de medição, separadamente para cada perfil de aquecimento. A Figura 8 sintetiza os resultados, incluindo a informação relativa aos graus hora de aquecimento (HDH – *heating degree hours*) e à temperatura média diária exterior (TMDe) das diferentes semanas de ensaio.

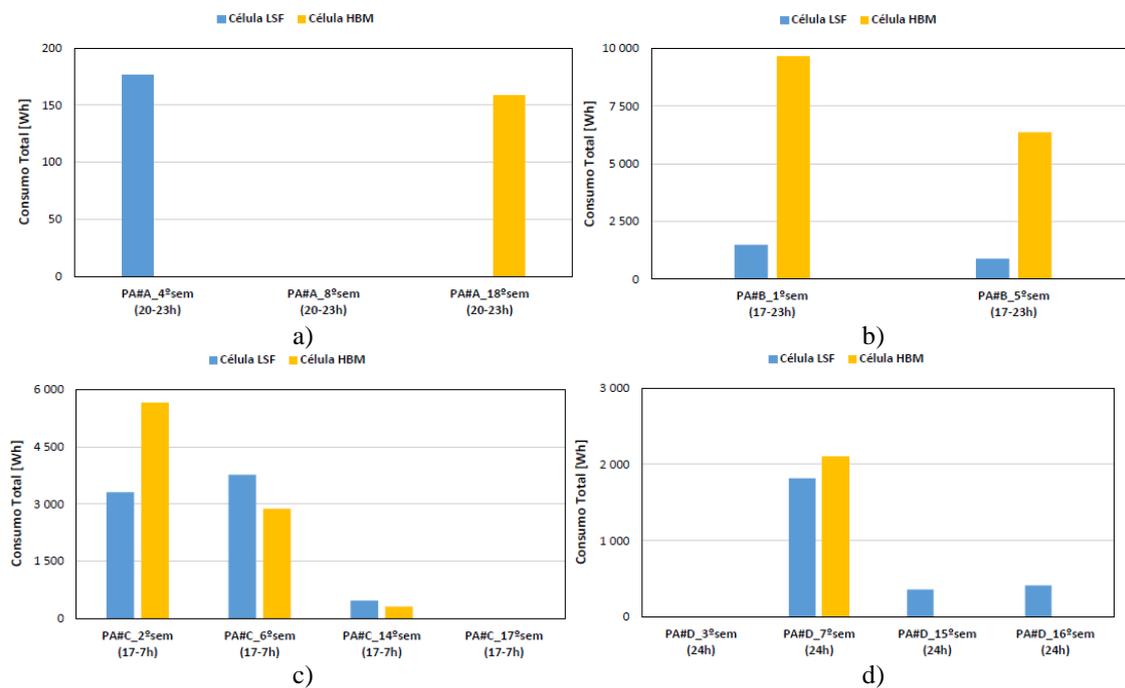


Figura 7 – Consumo total de energia de cada semana de teste para o perfil de aquecimento: a) A; b) B; c) C; d) D.

Perfil de Aquecimento	Semana	HDH (°C)	TMDe (°C)	Consumo Energético total [W]	
				LSF	HBM
PA#A (20-23h) 3h de aquecimento	4°	807	13.4	176	0
	8°	1002	12.2	0	0
	18°	948	12.4	0	159
PA#B (17-23h) 6h de aquecimento	1°	1303	10.1	1486	9664
	5°	1132	11.3	893	6373
PA#C (17-7h) 14h de aquecimento	2°	934	12.5	3308	5651
	6°	1134	11.3	3764	2882
	14°	581	14.8	473	323
	17°	718	13.9	0	0
PA#D (24h) 24h de aquecimento	3°	641	14.2	0	0
	7°	950	12.4	1819	2093
	15°	743	13.9	360	0
	16°	913	12.6	414	0

Figura 8 – Consumos totais, graus hora de aquecimento (HDH) e temperatura média diária exterior (TMDe)

É possível observável que as semanas que necessitaram de um maior consumo de energia foram aquelas que apresentaram um índice de HDH superior a 1000 °C e uma TMDe inferior a 12 °C, ocorrendo a diminuição da necessidade de aquecimento para temperaturas exteriores superiores. Estas circunstâncias coincidiram com o perfil de aquecimento B (6h de aquecimento intermitente, das 17 às 23h), tendo a célula de teste em LSF apresentado um desempenho energético significativamente melhor do que o desempenho observado na célula HBM.

No entanto, a variabilidade encontrada nos restantes períodos de ensaio, não permitem estender esta conclusão para outras condições de fronteira, sendo necessário mais investigação neste domínio.

4. Conclusões

Neste trabalho são apresentados os resultados de uma extensa campanha de monitorização do comportamento térmico e do desempenho energético de duas células de teste, uma representativa da construção corrente em betão e alvenaria (HBM) e a outra representativa da construção leve em aço enformado a frio (LSF). Este trabalho teve como objetivo avaliar a influência do padrão de aquecimento, intermitente ou contínuo em edifício de carácter residencial. A análise dos resultados, permitiu as seguintes conclusões:

- o clima moderado de Albergaria-a-Velha condicionou maiores amplitudes nos resultados, ocorrendo vários períodos em que não foi necessário ligar o sistema de aquecimento para garantir a temperatura interior de 18;0 °C (*setpoint* definido para o arranque dos sistemas);
- o perfil de aquecimento conduz a diferentes respostas por parte das soluções construtivas. Perfis de aquecimento de menor duração, nomeadamente o perfil B (17-23h), resultaram num consumo energético cerca de sete vezes inferior na solução em LSF, comparativamente ao sistema construtivo em HBM. Este resultado confirma que as soluções leves apresentam uma resposta quase imediata ao sistema de aquecimento, apontando para um desempenho interessante e promissor num contexto de aquecimento intermitente;
- a variabilidade encontrada nos resultados, não permite conclusões definitivas, sendo necessário mais investigação neste domínio, nomeadamente através de uma nova campanha de monitorização em que seja reduzido o número de perfis de aquecimento analisados, mas prolongando-se a sua duração para minimizar os impactos do clima exterior.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado por:

Financiamento Base - UIDB/04708/2020 da Unidade de Investigação CONSTRUCT - Instituto

de I&D em Estruturas e Construções - financiada por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC);

Financiamento Base - UIDB/04450/2020 da Unidade de Investigação RISCO – *Risks and Sustainability in Construction* – financiada por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC).

Este trabalho teve ainda o suporte financeiro e técnico da empresa Perfisa – Fábrica de Perfis Metálicos, S.A.

Referências

- [1] A. Dimosthenis, A. Sarigiannis, Combined or multiple exposure to health stressors in indoor built environments, *World Health Organization Rep. Eur.*, no. October, p. 82, 2014.
- [2] Council of the European Union, *Your Key to European Statistics*, Eurostat, 2020. <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/ddn-20220617-1>.
- [3] S.A.M. Barbosa, *Comparação do índice de desconforto passivo com a classe energética de edifícios de habitação reabilitados do sul da europa*, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2020.
- [4] G. Evola, L. Marletta, S. Natarajan, E. Maria Patanè, Thermal inertia of heavyweight traditional buildings: Experimental measurements and simulated scenarios, *Energy Procedia*, 133 (2017) 42–52. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.369>.
- [5] E. Roque, R. Vicente, R.M.S.F. Almeida, Opportunities of Light Steel Framing towards thermal comfort in southern European climates: Long-term monitoring and comparison with the heavyweight construction, *Build. Environ.*, 200 (2021) 107937. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107937>.
- [6] M. Kottek, J. Grieser, C. Beck, B. Rudolf, F. Rubel, World map of the Köppen-Geiger climate classification updated, *Meteorol. Zeitschrift*, 15(3) (2006) 259–263. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>.
- [7] E. Roque, *Indoor Thermal Comfort and Energy Performance of Residential Light Steel Framing Buildings*, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil apresentada à Universidade de Aveiro, 2021.
- [8] ISO 13790:2008. *Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling*, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2008.

ORCID

Ricardo M.S.F. Almeida	0000-0002-9846-6081 (https://orcid.org/0000-0002-9846-6081)
Romeu Vicente	0000-0002-5456-1642 (https://orcid.org/0000-0002-5456-1642)
António Figueiredo	0000-0003-4324-7006 (https://orcid.org/0000-0003-4324-7006)
Mário Figueiredo	0009-0003-3464-2220 (https://orcid.org/0009-0003-3464-2220)

Comportamento físico de janelas em fibra de vidro

Physical behaviour of fibre glass windows

N. Simões^{a,b,†}, N. Vieira^c, J. Prata^{a,b}, A. Vieira^b

^a *Universidade de Coimbra, CERIS, Departamento de Engenharia Civil, Coimbra, Portugal*

^b *Itecons, Coimbra, Portugal*

^b *FWD, Porto, Portugal*

[†] *Autor para correspondência: nasimoes@dec.uc.pt*

RESUMO

A opção por janelas minimalistas é uma tendência arquitetónica que tem tido um franco crescimento no mercado nacional e internacional e que tem despertado o interesse de vários fabricantes por serem sistemas com um valor comercial apreciável, já que são tipicamente comercializadas para preencher vãos de grandes dimensões. O tipo de abertura é principalmente de correr, o que associado à grande dimensão, resulta num conjunto de desafios a ter em conta no desenvolvimento de janelas. O minimalismo é conseguido com recurso à redução da dimensão dos perfis, em particular nas vistas em alçado. A conjugação da reduzida dimensão dos perfis, a tipologia de abertura de correr e as grandes áreas condiciona o comportamento térmico, acústico, permeabilidade ao ar, estanquidade à água e resistência ao vento.

A opção por perfis não metálicos poderá beneficiar o comportamento térmico e reduzir o impacto ambiental por serem materiais com menor massa volúmica e condutibilidade térmica. No entanto, o seu desenvolvimento tem que ser cuidado de modo a não comprometer a resistência mecânica, já que uma maior deformabilidade dos perfis terá impacto direto nos níveis de permeabilidade ao ar, estanquidade à água e resistência ao vento. A fibra de vidro é um material que pode ser usado para fabricar perfis. O objetivo principal deste trabalho é apresentar a caracterização térmica e física de janelas utilizando esse material.

Baseado nos resultados dos ensaios de permeabilidade ao ar, estanquidade à água e resistência ao vento, assim como nos resultados do cálculo de transmissão térmica, foi possível identificar um conjunto de regras que podem ser usadas para garantir um desempenho satisfatório de janelas de correr minimalistas utilizando fibra de vidro para produzir os perfis. Os ensaios foram realizados no laboratório de Itecons no âmbito do projeto “Evoslide”, cuja empresa promotora líder é a FWD.

ABSTRACT

Minimalist windows are an architectural trend that has great commercial value but which also brings up specific challenges. The preference for minimalist systems appears to be enduring, mainly because large window panes with slim frames are aesthetically pleasing and allow more natural light and sunlight to come into a building. However, these solutions, in particular sliding windows, are known to have some functional disadvantages in terms of thermal and acoustic performance, watertightness and durability.

Non-metal window solutions have better thermal behaviour and, even in the most aggressive environments, they are not subject to oxidation and corrosion, which are common phenomena in the currently available solutions. Non-metal frames are lighter and may well have a smaller ecological footprint. However, they have to

Palavras-chave:

Janelas; caixilho em fibra de vidro; desempenho térmico; estanquidade à água; resistência ao vento; permeabilidade ao ar.

Keywords:

Windows; fibreglass frame; thermal behaviour; watertight; wind resistance; air permeability.

ensure a good mechanical behaviour and offer adequate wind resistance and watertightness. Fibreglass is one option that can be used to produce frames. The main objective of this work is to present the thermal and physical characterization of windows using this material.

Based on preliminary air permeability, watertightness and wind resistance tests, together with thermal transmittance calculations, the fibreglass solution appears to be promising. This paper presents the results of a programme of experiments carried out at Itecons' laboratory under the research project "Evoslide", leaderead by the company FWD.

1. Introdução

O desempenho térmico da envolvente de um edifício depende, principalmente, da qualidade da sua envolvente opaca (paredes, coberturas e pavimentos), mas pode também ser largamente condicionado pelos elementos envidraçados. Como parte integrante das fachadas e coberturas, os vãos envidraçados devem também contribuir para limitar as ações externas, salvaguardando a segurança e o bem estar dos ocupantes. As janelas têm-se tornado cada vez mais relevantes para atingir um bom comportamento energético e a procura de soluções ótimas é uma prioridade entre fabricantes e investigadores ([1],[2]).

O desempenho térmico de uma janela [3] é normalmente caracterizado pelo seu coeficiente de transmissão térmica (U_w), que é calculado de acordo com as metodologias recomendadas nas normas ISO 10077-1:2017 [4] e ISO 10077-2:2017 [5] ou através de ensaios realizados de acordo com o método da Hot-box, de acordo com as normas ISO 8990:1994 [6] e ISO 12567-1:2010 [7]. Este parâmetro depende da transmissão térmica do vidro (U_g) e do caixilho (U_f), bem como da transmissão térmica linear (Ψ) [8], que descreve o fluxo de calor adicional causado pela interação entre o caixilho e o vidro. Um dos elementos mais críticos nas janelas é o caixilho.

Nos últimos anos, a introdução de vidros duplos e triplos que incluem películas de baixa emissividade e gases inertes, permitiu às janelas atingir um desempenho térmico superior [9]. Esta melhoria pode ser ainda mais significativa quando se opta por espaçadores térmicos não metálicos no perímetro entre vidros, permitindo uma redução de cerca de 10% do valor do U_w ([9],[10]). Por outro lado, poucas alterações têm sido feitas nos perfis dos caixilhos, tanto a nível técnico como no que respeita à seleção de materiais inovadores adequados. O caixilho pode representar cerca de 20% a 30% da área total da janela e corresponde a um ponto fraco termicamente, uma vez que o seu coeficiente de transmissão térmica é, geralmente, muito mais elevado do que o das zonas envidraçadas. Além disso, no Inverno, a concentração de perdas de calor nos caixilhos origina temperaturas baixas na sua superfície interior, o que contribui para um maior risco de ocorrência de condensação ([11],[12],[13]).

A madeira foi um dos primeiros materiais utilizados na produção de caixilhos de janelas. No entanto, este é um material que requer uma maior manutenção. Assim, apesar do bom desempenho térmico que apresenta (com valores de U_w que atualmente podem variar entre 1,5 e 2,0 W/(m²°C) ([4],[2])), os caixilhos de madeira não são uma alternativa na construção intensiva. Uma solução amplamente utilizada é o PVC, que apresenta uma maior resistência térmica comparativamente às soluções de alumínio. Os caixilhos em PVC oferecem valores de U_f que podem variar entre 1,6 e 2,8 W/(m²°C) [2]. No entanto, os perfis em PVC caracterizam-se por uma baixa rigidez estrutural e são normalmente reforçados com perfis metálicos internos. Por sua vez, os caixilhos de alumínio apresentam valores próximos dos 6 W/(m²°C). Apesar do seu baixo desempenho térmico, o alumínio é amplamente utilizado devido à sua elevada resistência mecânica e durabilidade. De forma a reduzir os coeficientes de transmissão térmica, os caixilhos de alumínio podem receber um perfil de rotura térmica, normalmente feito de poliamida, permitindo valores de U_f entre 1,4 e 4,0 W/(m²°C) ([4],[2]). Para obter desempenhos melhorados, surgiram também no mercado caixilhos que combinam diferentes materiais, tais como alumínio e madeira.

Vários estudos sublinham a importância de seguir novas estratégias para o desenvolvimento de novas soluções com elevado desempenho térmico ([2],[14]) e baixo impacto

ambiental [15]. Recentemente, surgiu uma alternativa interessante aos materiais convencionais, que são os perfis de caixilharia em fibra de vidro. Appelfeld et al. [1] apresentaram um estudo de perfis de caixilharia de fibra de vidro reforçada. Os resultados apresentam um bom comportamento térmico e mecânico e os perfis em fibra de vidro aparentam ser uma alternativa fiável. Relativamente ao comportamento ambiental, Shiva et al. [15] avaliaram o impacto total do Ciclo de Vida (LC) de uma parede virada a sul com soluções envidraçadas e concluíram que janelas de alumínio contribuem para o impacto total do LC da parede em cerca de 16-31%, enquanto que, nas janelas com caixilhos em fibra de vidro, este valor para cai para cerca de 8-23%.

Outros aspetos de grande importância para um bom desempenho das janelas são a estanquidade ao ar e à água e a resistência ao vento [16]. A infiltração do ar devido à baixa estanquidade ao ar das janelas pode comprometer o desempenho energético dos edifícios [17], bem como o conforto térmico dos moradores [18]. Além disso, um elevado nível de permeabilidade ao ar também afeta o comportamento acústico das fachadas [19]. Por outro lado, a falta de estanquidade à água também é indesejável, uma vez que contribui para a deterioração prematura dos elementos de construção nas proximidades das janelas [20]. A resistência ao vento pode ser avaliada experimentalmente de acordo com a norma EN 12211:2016 [21]. A deformação máxima alcançada quando a janela é sujeita a grandes diferenças de pressão é medida e a capacidade de suportar picos de pressão sem falhas pode ser observada. Ao contrário da resistência ao vento, a estanquidade ao ar e à água é difícil de prever e pode ficar comprometida com falhas na fabricação e instalação das janelas [22]. Por este motivo, tanto a permeabilidade ao ar como a estanquidade à água são geralmente determinadas em laboratório, de acordo com as normas EN 1026:2016 [23] e EN 1027:2016 [24], respetivamente. Relativamente à estanquidade à água, Van Den Bossche [16] realizou recentemente um levantamento exaustivo de estudos experimentais (em laboratório e in-situ), do qual concluiu que as janelas de correr são consistentemente as que apresentam o pior desempenho. Este tipo de sistema de abertura também compromete a permeabilidade ao ar (que aumenta) e o desempenho térmico e acústico. No entanto, como é frequentemente uma preferência de arquitetos, promotores e proprietários, merece ainda mais ser um alvo de investigação e de desenvolvimentos.

Motivados pelo desafio de desenvolver janelas de correr minimalistas utilizando perfis em fibra de vidro, o objetivo principal do presente estudo é a avaliação do desempenho térmico, de uma nova geração de geometrias deste tipo de perfis. Como parte do desenvolvimento, foi ainda realizado um conjunto de testes laboratoriais a fim de obter os níveis de isolamento sonoro aos sons aéreos, o desempenho em termos de permeabilidade ao ar e à água, bem como a classificação da resistência ao vento para uma geometria semelhante às utilizadas nas janelas convencionais. Baseado nos resultados dos ensaios, foi possível identificar um conjunto de regras que podem ser usadas para garantir um desempenho satisfatório de janelas de correr minimalistas utilizando fibra de vidro. Os ensaios foram realizados no laboratório de Itecons no âmbito do projeto Evoslide, cuja empresa promotora líder é a FWD.

2. Materiais e métodos

A subsecção seguinte descreve as geometrias dos perfis utilizados nos ensaios de laboratório e a nova geometria em desenvolvimento, bem como os respetivos cálculos de transmissão térmica.

2.1. Descrição dos perfis

Numa primeira fase, foram instalados três provetes de janelas de correr na câmara de ensaios de caixilhos do Itecons para serem caracterizados em termos de permeabilidade ao ar, água e vento. As janelas caracterizam-se por terem perfis com geometrias próximas das utilizadas nas janelas convencionais. O primeiro provete, mostrado na Figura 1a), consiste numa janela de correr com duas folhas móveis, com dimensões externas (Altura) x (Comprimento) de 3,0 x 3,0 m. O segundo provete (Figura 1b), em que a preocupação era acrescentar uma terceira folha, tem dimensões externas de 2,25 x 3,84 m. O terceiro provete (Figura 1c) é novamente composto por

duas folhas móveis, mas com uma dimensão maior do que o primeiro, 3,0 x 4,8 m.

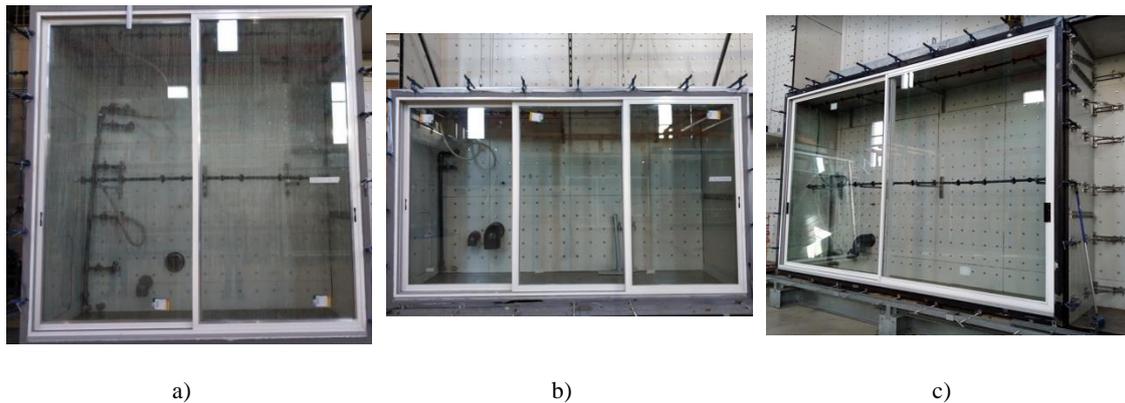


Figura 1 - Ensaios de permeabilidade ao ar, estanqueidade à água e resistência ao vento: a) janelas de correr com 2 folhas móveis (3,0 m x 3,0 m); b) janelas de correr com três folhas móveis (2,25 m x 3,84 m); c) janelas de correr com duas folhas móveis (3,0 m x 4,8 m).

Em termos de caracterização acústica foram usadas as câmaras reverberantes do Itecons. Foi construída uma parede com uma área de 10 m² num aro. A parede é composta por dois panos de betão separados por uma camada de lã mineral. A parede tinha uma abertura de aproximadamente 7 m² para a instalação do provete de ensaio (uma janela de correr com uma folha móvel com as dimensões nominais de 2,42 m x 2,86 m). A figura 2 mostra a janela dentro das câmaras acústicas.



Figura 2 - Instalação da janela dentro das câmaras acústicas: a) vista da câmara emissora; b) vista da câmara recetora.

No âmbito do projeto foram desenvolvidos desenhos para um novo perfil minimalista em fibra de vidro. O cálculo do seu comportamento térmico foi determinado, e depois foram aplicadas medidas de melhoria. Para tal, foi determinado o valor de transmissão térmica (valor U_f) de cada perfil do caixilho (lateral, central e superior) e analisado o impacto da redução da espessura dos perfis e do preenchimento das cavidades de ar com um material isolante.

A figura 3 ilustra os desenhos esquemáticos dos perfis minimalistas de fibra de vidro otimizados com um material isolante que preenche as cavidades de ar.

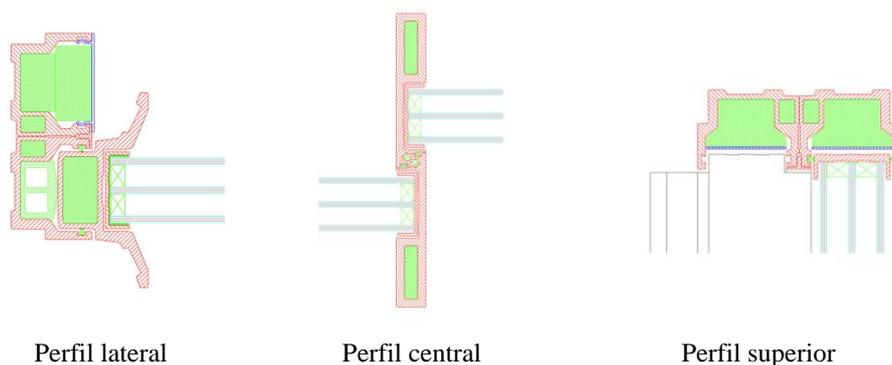


Figura 3 - Desenhos esquemáticos dos perfis minimalistas com material isolante (a verde) a preencher as cavidades de ar.

A Tabela 1 apresenta as propriedades físicas dos materiais, necessárias ao cálculo do coeficiente de transmissão térmica dos perfis do caixilho.

Tabela 1 - Propriedades físicas dos materiais considerados nos cálculos da transmissão térmica dos perfis.

Componente	Material	Condutividade térmica [W/(m.°C)]
Perfil do caixilho	Fibra de vidro	0,30
	Policarbonato	0,20
	Pelúcias	0,14
	EPDM	0,25
	Espuma de isolamento térmico	0,023
Painel isolante (ISO 10077-2)		0,035

2.2. Métodos

Nesta subsecção, é feita uma breve descrição dos princípios de ensaios e cálculo realizados. Estes referem-se às principais normas que devem ser seguidas de acordo com a norma de produto das janelas, Norma Europeia EN 14351-1:2006+A2:2016.

Cálculo da transmissão térmica: a transmissão térmica de cada perfil de caixilharia da janela, U_f , foi determinada de acordo com a norma ISO 10077-2:2017 utilizando um método de cálculo numérico bidimensional de acordo com a norma ISO 10211:2017. Para este fim, foi utilizado o software Bisco, da Physibel. O software aplica o método das diferenças finitas Cranck-Nicolson.

Ensaio da permeabilidade ao ar: este teste é realizado de acordo com a norma EN 1026:2016 e baseia-se na aplicação de uma série crescente de pressões de teste (positivas e negativas) no provete de ensaio, determinando-se a sua permeabilidade ao ar através da medição de fluxo de ar que atravessa o provete. O provete ensaiado é classificado de acordo com o especificado na norma EN 12207:2016.

Ensaio de estanqueidade à água: este teste é realizado de acordo com a norma EN 1027:2016. O provete de ensaio é classificado conforme especificado na norma EN 12208:1999. O ensaio consiste na pulverização da superfície do provete de ensaio expectável de ser molhada, de forma contínua e regularmente dispersa, com um caudal especificado de água, enquanto incrementos positivos de pressão de teste são aplicados em intervalos de tempo regulares. É registado o instante e o local por onde o provete perde a estanqueidade.

Ensaio de Resistência ao vento: este teste é realizado de acordo com a norma

EN 12211:2016. O provete de ensaios é classificado conforme especificado na norma EN 12210:2016. O ensaio de resistência ao vento subdivide-se na realização de três testes distintos e sucessivos ao provete de ensaio. O primeiro teste (teste de flecha) permite aferir se o provete tem uma deformação admissível ou não. O segundo teste (teste de pressão repetida) testa a capacidade do provete para conservar as suas propriedades. E o terceiro teste (teste de segurança) verifica a segurança dos utilizadores através da sujeição do provete a condições extremas.

Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea, R_w : O teste é realizado no laboratório, em conformidade com a norma ISO 10140-2:2010, utilizando o seguinte procedimento: medição do nível de pressão sonora na sala da fonte para 2 posições de fonte e dentro da gama de varrimento de um microfone em movimento; medição simultânea do nível de pressão sonora na sala recetora durante uma rotação do microfone e para as mesmas 2 posições da fonte emissora dentro da sala da fonte; medição do ruído de fundo dentro da gama de varrimento de um microfone em movimento na sala recetora (com a fonte desligada); avaliação dos tempos de reverberação na sala recetora considerando 1 posição da fonte e 2 medições de decaimentos, pelo menos, para 3 posições de microfone. A curva de isolamento sonoro normalizada é então determinada em conformidade com a norma ISO 10140-2:2010, e o índice de isolamento sonoro é determinado em conformidade com a norma ISO 717-1:2013.

3. Resultados

3.1. Ensaio de permeabilidade ao ar, estanquidade à água e resistência ao vento

A classificação dos provetes em termos de permeabilidade ao ar, estanquidade à água e resistência ao vento foi feita de acordo com as normas de classificação EN 12207:2016, EN 12208:1999 e EN 12210:2016, respetivamente, como mencionado anteriormente.

O primeiro provete com dimensões externas de 3,0 m x 3,0 m atingiu as seguintes classes:

- **Classe 2** para permeabilidade ao ar (a classe 4 é a máxima);
- **Classe 4A** para estanquidade à água (o que significa que a estanquidade foi perdida aos 200 Pa de pressão);
- **Classe B1** para a resistência ao vento (B é a classe de flecha média, 1 é uma resistência muito baixa à pressão do vento).

Para avaliar a influência da utilização de um perfil central reforçado nos resultados dos ensaios, o perfil foi reforçado e os ensaios foram repetidos, conduzindo aos seguintes resultados

- **Classe 2** para permeabilidade ao ar (igual à anterior);
- **Classe 4A** para a estanquidade à água (igual à anterior);
- **Classe B3** para a resistência ao vento (mesma classe de flecha para pressões de vento mais elevadas).

A comparação dos resultados mostra que o reforço permite uma melhoria muito significativa sob a ação do vento. A classe B1 obtida inicialmente significa que, para uma pressão de ensaio de 400 Pa, a flecha frontal relativa foi inferior a 1/200. Após o reforço do perfil central, a deformação frontal relativa medida para uma pressão de ensaio 3 vezes superior (1200 Pa) foi 1/279, sendo menor do que a medida inicialmente.

Para a janela de correr com três folhas móveis (proвете 2) com um perfil central reforçado, os resultados obtidos foram os seguintes:

- **Classe 2** para permeabilidade ao ar;
- **Classe 4A** para a estanquidade à água;
- **Classe C2** (flecha frontal relativa de 1/310) para a resistência ao vento.

Os resultados obtidos permitem-nos concluir que a adição de uma folha não afetou o desempenho do sistema.

O terceiro provete, que era uma janela de correr de duas folhas com uma área muito grande, de 3,0 m x 4,8 m, obteve os seguintes resultados no primeiro conjunto de ensaios:

- **Classe 3** para permeabilidade ao ar;
- **Classe 2A** para a estanquidade à água;
- **Classe A1** (flecha frontal relativa de 1/182) para a resistência ao vento.

Posteriormente, foram feitas as seguintes modificações na janela:

- Alterações no sistema de fixação de reforço central;
- Instalação de componentes de vedação adicionais na zona de cruzamento entre o perfil vertical e o perfil horizontal inferior;
- Instalação de um perfil do tipo goteira reproduzindo um segundo nível de drenagem;
- Instalação de tampa de drenagem com deflectores.

Após a realização das alterações acima mencionadas, os ensaios laboratoriais foram repetidos, e os resultados foram os seguintes:

- **Classe 3** para permeabilidade ao ar;
- **Classe 5A** para a estanquidade à água;
- **Classe B2** (flecha frontal relativa de 1/224) para resistência ao vento.

Estes resultados mostram que os perfis de fibra de vidro podem ser utilizados em janelas de correr e aplicados em zonas em que a ação do vento não seja muito intensa.

3.2. Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea

Uma janela com uma folha móvel e uma folha fixa foi testada em laboratório. A janela tem dimensões nominais de 2,42 m x (L) 2,86 m e vidros duplos compostos por: vidro de 8 mm termicamente temperado "SGG SECURIT PLANICLEAR (Plux) 8 mm", caixa de ar de 14 mm (90 % Árgon) e vidro laminado de 8,76 mm "SGG STADIP SILENCE 44.2".

Para avaliar o impacto das modificações no sistema de janelas, foram realizados quatro ensaios acústicos. O primeiro teste (Teste 1) permitiu a deteção de pontos fracos no isolamento acústico na área de contacto entre os perfis centrais, particularmente nos topos (inferior e superior). Na primeira tentativa de corrigir estes pontos fracos (testes 2 e 3), foram aplicadas as seguintes medidas: reforço do isolamento do perfil inferior da folha fixa; aplicação de uma junta de borracha na zona de contacto entre a folha fixa e a folha móvel; e melhoria da vedação das partes superiores do perfil central da folha fixa. Finalmente (Teste 4), os perfis da folha fixa foram preenchidos com lã mineral e a selagem da zona da ombreira foi melhorada com perfis de junta entre o caixilho e a folha. A Figura 4 mostra representações gráficas do índice de redução sonora, R_w , em bandas de frequência de terceira oitava entre 100 Hz e 5000 Hz, para cada teste realizado.

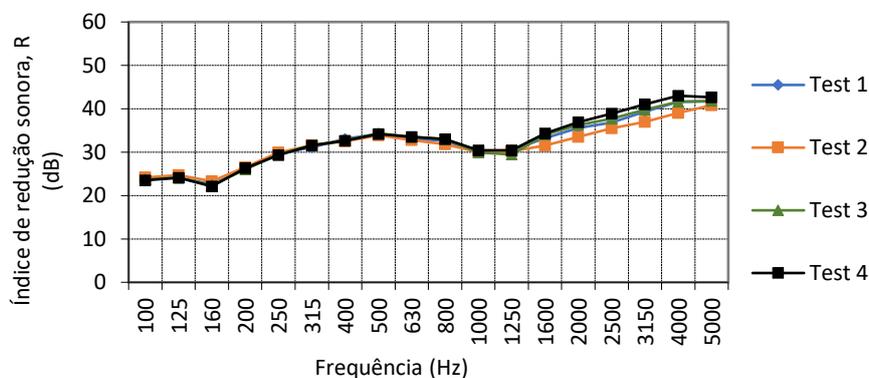


Figura 4 - Representação gráfica do índice de redução sonora, R , em bandas de frequência de terceira oitava, entre 100 Hz e 5000 Hz, para cada teste realizado (Testes 1 a 4).

A Tabela 2 apresenta um resumo dos resultados obtidos nos ensaios acústicos realizados em laboratório (Testes 1 a 4).

A Tabela 3 mostra os valores de U_f dos perfis de caixilharia em fibra de vidro otimizados (Figura 3) bem como a redução de U_f , em %, quando comparada com os perfis iniciais (sem um material isolante a encher as cavidades de ar).

Tabela 2 - Resultados obtidos nos ensaios de determinação do índice de isolamento a sons aéreos.

Frequência [Hz]	Índice de redução sonora, R [dB]			
	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4
R_w (C; C_{tr} ; $C_{100-5000}$; $C_{tr,100-5000}$) [dB]	34 (-1; -3; -1; -3)	33 (-1; -2; 0; -2)	34 (-1; -3; -1; -3)	35 (-2; -4; -1; -4)

A Figura 5 ilustra alguns exemplos de detalhes construtivos das configurações testadas.



Figura 5 - Detalhes construtivos das configurações testadas: a) juntas do caixilho fixo; b) juntas do caixilho fixo (zona central); c) vedação inferior do perfil central da folha móvel; d) vedação inferior do perfil central da folha fixa; e) vedação da zona de encontro do caixilho fixo e da zona de bloqueio da folha móvel; f) reforço da vedação da central na zona de encontro do caixilho fixo e da zona de bloqueio da folha móvel com juntas; g) aspeto visual das ranhuras de drenagem da folha móvel; h) aspeto visual da vedação dos perfis.

Tabela 3 - Transmissão térmica dos perfis em fibra de vidro otimizados utilizados na janela de correr minimalista.

Perfil	U_f [W/(m ² .°C)]	Redução do U_f [%]
Central	4,986	0,20
Lateral esquerdo	0,941	33,6
Lateral direito	0,908	36,3
Superior esquerdo	0,911	49,0
Superior direito	0,892	49,1

Os resultados mostram que os valores U_f dos perfis de fibra de vidro são significativamente inferiores aos das soluções de janelas minimalistas atualmente disponíveis no mercado que, em média, apresentam valores U_f de 3,5 W/(m².°C) para os perfis laterais e 14 - 25 W/(m².°C) para o perfil central.

Os resultados mostram também que os perfis de fibra de vidro podem ser otimizados enchendo as caixas-de-ar com um material isolante. Esta medida permite uma redução do valor U_f até 49%.

4. Conclusões

Neste trabalho de investigação foi realizado um conjunto de ensaios laboratoriais com o objetivo de avaliar a viabilidade do uso de perfis em fibra de vidro em janelas de correr, tendo

por base a garantia de um comportamento satisfatório. Foi determinado o isolamento sonoro a sons aéreos, o desempenho em termos de permeabilidade ao ar, estanquidade à água e resistência ao vento. Estes testes preliminares foram realizados sobre uma geometria semelhante à utilizada nas janelas convencionais. Como este tipo de material e perfis demonstram ser promissores, a segunda fase do trabalho consistiu em desenvolver e otimizar uma geometria do perfil para uma janela de correr minimalista com base no seu desempenho térmico. Os valores de transmissão térmica, U_f , dos perfis otimizados foram determinados e apresentados no trabalho. Os resultados mostram que os perfis de fibra de vidro podem ser uma alternativa aos perfis de alumínio, não só para janelas convencionais, mas também para janelas de correr minimalistas.

Agradecimentos

Esta investigação foi suportada pelo projeto **EvoSlide**, com o título “Evolution in Window Sliding System” (POCI-01-0247-FEDER-033658) financiado pelo Compete 2020 e pelo FEDER.

Referências

- [1] D. Appelfeld, C.S. Hansen, S. Svendsen, Development of a slim window frame made of glass fiber reinforced polyester, *Energy Build.* 42 (2020) 1918-1925.
- [2] A. Gustavsen, B.P. Jelle, D. Arasteh, C. Kohler, State-of-the-Art Highly Insulating Window Frames. Research and Market Review, SINTEF Build. Infrastruct., Project report 6, 2007.
- [3] N. Simões, J. Prata, S. Martins, A. Tadeu, Thermal Performance of Windows: Experimental Validation of Numerical Results, 39th IAHS (International Association for Housing Science) World Congress, 17 to 20 de September, Milan, Italy, 2013.
- [4] International Organization for Standardization (ISO). ISO 10077-1, Thermal performance of windows, doors and shutters - Calculation of thermal transmittance - Part 1: General, 2017.
- [5] International Organization for Standardization (ISO). ISO 10077-2, Thermal performance of windows, doors and shutters - Calculation of thermal transmittance - Part 2: Numerical method for frames, 2017.
- [6] International Organization for Standardization (ISO). ISO 8990, Thermal insulation - Determination of steady-state thermal transmission properties - Calibrated and guarded hot box, 1994.
- [7] International Organization for Standardization (ISO). ISO 12567-1, Thermal performance of windows and doors - Determination of thermal transmittance by hot box method - Part 1: Complete windows and doors, 2010.
- [8] A. Tadeu, I. Simões, N. Simões, J. Prata, Simulation of dynamic linear thermal bridges using a boundary element method model in the frequency domain. *Energy Build.* 43 (12) (2011) 3685–3695.
- [9] B.P. Jelle, A. Hynd, A. Gustavsen, D. Arasteh, H. Goudey and R. Hart, Fenestration of today and tomorrow: A state-of-the-art review and future research opportunities, *Sol. Energy Mater Sol. Cells*, 96 (2012) 1-28.
- [10] DGS Group: www.dgsgroup.co.uk/catalogues/spacer/.
- [11] B. Moshfegh, D. Loyd and B. Karlsson, Heat transfer at modern windows - risk of condensation, *Energy Build.*, 13 (1989) 119-125.
- [12] J. Kim, T. Kim, S. Leigh, Double window system with ventilation slits to prevent window surface condensation in residential buildings, *Energy Build.*, 43 (2011) 3120-3130.
- [13] International Organization for Standardization (ISO). ISO 13788, Hygrothermal performance of building components and building elements - Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation - Calculation methods, 2001.
- [14] M. Löffler and D. Buck, Glazing Edge-Seal using Foamglass as Spacer and Frameless window design, *Sol. Energy*, 61(5) (1997) 303-312.
- [15] S. Saadatian, N. Simões, F. Freire, Integrated environmental, energy and cost life-cycle analysis of windows: Optimal selection of components, *Build. Environ.*, 188 (2021).
- [16] N. Van Den Bossche, A. Janssens, Airtightness and watertightness of window frames: Comparison of performance and requirements, *Build. Environ.*, 110 (2016) 129-139.

- [17] M. Sherman, R. Chan, *Building Airtightness: Research and Practice*. Lawrence Berkeley National Laboratory Report No. LBNL-53356, 2004.
- [18] P.O. Fanger, A.K. Melikov, H. Hanzawa, J. Ring, Air turbulence and sensation of draught, *Energy Build.*, 12 (1) (1988) 21-39.
- [19] V. Iordache, T. Catalina, Acoustic approach for building air permeability estimation, *Build. Environ.*, 57 (2012) 18-27.
- [20] J. Straube, E. Burnett, Rain control and design strategies, *J. Therm. Envelope Build. Sci.*, 23 (1999) 41-56.
- [21] European Standards (EN). EN 12211 - Windows and doors - Resistance to wind load - Test method, 2016.
- [22] RDH, *Water Penetration Resistance of Windows e Study of Manufacturing, Building Design, Installation and Maintenance Factors*, RDH Building Engineering Limited, Vancouver, 2002.
- [23] European Standards (EN). EN 1026, Windows and doors - Air Permeability - Test method, 2016.
- [24] European Standards (EN). EN 1027, Windows and doors - Watertightness - Test method, 2016.
- [25] International Organization for Standardization (ISO). ISO 10211, *Thermal bridges in building construction – Heat flows and surface temperatures – Detailed calculations*, 2017.

ORCID

Nuno Simões 0000-0003-3418-0030 (<https://orcid.org/0000-0003-3418-0030>)
Nuno Vieira 0009-0009-2425-5124 (<https://orcid.org/0009-0009-2425-5124>)
Joana Prata 0000-0003-3413-8895 (<https://orcid.org/0000-0003-3413-8895>)

Termografia de infravermelhos para análise de humidade em paredes – ensaios preliminares e perspetivas futuras

Infrared thermography for moisture analysis in walls – preliminary tests and future perspectives

L.C.M. Dafico^{a†}, E. Barreira^a, R.M.S.F. Almeida^b, R.S. Vicente^c

^a *CONSTRUCT-LFC, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia (FEUP), Universidade do Porto, Rua Dr Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, Portugal*

^b *Departamento de Engenharia Civil, Instituto Politécnico de Viseu, Campus Politécnico de Repeses 3504-510 Viseu, Portugal*

^c *RISCO, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Campus Universitário de Santiago 3810-193 Aveiro, Portugal*

[†] *Autor para correspondência: up201911110@up.pt*

RESUMO

Defeitos relacionados à humidade representam 70% das patologias reportadas em edificações, comprometendo a durabilidade de soluções e componentes e a médio prazo o conforto dos utilizadores. A termografia de infravermelhos (TIV) é uma técnica que possui grande potencial para mapear a humidade em edificações, mas carece de critérios para análises quantitativas que correlacionem diferenças de temperatura superficial com o teor de humidade. Apesar dos recentes avanços na utilização de métodos computacionais e técnicas de ensaio para automatizar a deteção de defeitos em edificações, o uso destes para análise de problemas associados à presença de humidade não está consolidado. Este trabalho apresenta os resultados de ensaios preliminares realizados com a TIV e o método gravimétrico para avaliar a correlação entre o gradiente de temperatura e o teor de humidade de alvenarias e analisar o gradiente térmico de regiões húmidas em diferentes condições ambientais. Análises estatísticas mostraram que a ordem de magnitude do gradiente de temperatura que indica altos teores de humidade é substancialmente diferente nos cenários analisados. Também são apontadas as limitações do uso da técnica e as indicações de pesquisas futuras que podem ser conduzidas para automatizar a identificação de defeitos relacionados à humidade em edificações, reduzindo o grau de subjetividade no diagnóstico de defeitos.

ABSTRACT

Defects related to moisture problems represent 70% of reported building defects, hindering the long-term durability of building solutions and components and, in the medium term, users' comfort. Infrared thermography (IRT) is a technique that has great potential for mapping moisture in buildings but lacks criteria for quantitative analysis that correlate surface temperature differences with moisture content. Although the recent advances in the use of computational methods and testing techniques to automate the detection of defects in buildings, their use for moisture assessment is not consolidated. This work presents the results of preliminary tests carried out with the IRT and the gravimetric method to evaluate the correlation between the temperature gradient and the moisture content of masonry and to analyse the thermal gradient of moist areas in different environmental conditions. Statistical analysis showed that the order of magnitude of the temperature gradient that indicates high moisture content is substantially

Palavras-chave:

Termografia de Infravermelhos; humidade; diagnóstico automatizado.

Keywords:

Infrared Thermography; Moisture; Automated diagnosis.

different in the analysed scenarios. Limitations in the use of IRT and indications for future research that can be conducted to automate the identification of defects related to moisture in buildings, reducing the degree of subjectivity in the diagnosis of defects, are also pointed out.

1. Introdução

A humidade é uma das principais causas de degradação de elementos construtivos e a complexidade do fenómeno envolvido na humificação e secagem dos materiais dificulta a interpretação dos resultados durante a inspeção de edificações. Um diagnóstico adequado de patologias relacionadas à humidade é importante para garantir a durabilidade das edificações e para assegurar o conforto dos usuários e a qualidade do ambiente interno, uma vez que altos teores de humidade podem levar à redução da performance térmica, à cristalização de sais e até mesmo à redução da resistência à compressão, bem como ao crescimento de mofo, aumentando o risco de infeções respiratórias dos usuários [1-6].

As técnicas escolhidas para detetar a presença de humidade devem proporcionar resultados rápidos e de fácil interpretação e permitir a definição da extensão do dano e a sua evolução ao longo do tempo [7]. O diagnóstico de defeitos relacionados à humidade pode ser feito com técnicas usuais, como o método gravimétrico, que consiste na extração de amostras, pesagem e secagem destas, fornecendo resultados altamente confiáveis [8], ou com métodos não destrutivos, como as técnicas baseadas na medição das propriedades elétricas dos materiais (método dielétrico, micro-ondas, tomografia de impedância elétrica), métodos químicos (método do papel indicador), método baseado na medição das propriedades térmicas (termografia infravermelha) e métodos com radiação (ressonância magnética nuclear e atenuação de raios gama) [2, 9].

A termografia de infravermelhos (TIV) pode ser utilizada para mapear a distribuição de humidade nos materiais de construção, pois mudanças no teor de humidade dos materiais estão relacionadas a mudanças em sua temperatura superficial, conforme três fenómenos físicos: resfriamento evaporativo, reduzida resistência térmica e elevada capacidade de armazenamento de calor [1].

O resfriamento evaporativo ocorre porque a evaporação superficial é uma reação endotérmica que reduz a temperatura da superfície. Quando o teor de humidade do material é superior à humidade do ambiente, ocorre a evaporação, o que leva à redução na temperatura superficial, logo, na ocorrência apenas desse fenómeno, áreas com altos teores de humidade aparecerão nas imagens térmicas com temperaturas menores do que áreas mais secas [10]. Os fatores que mais influenciam na evaporação superficial são a humidade relativa do ambiente próximo à superfície, a temperatura do ar e o teor de humidade, teor de sais solúveis e outras propriedades físico-químicas do material [11, 12].

Em relação à redução da resistência térmica, sabe-se que o calor específico e a condutibilidade térmica da água são superiores àqueles dos materiais secos. Portanto, quando há água nos poros dos materiais, sua densidade, calor específico e condutibilidade térmica aumentam [12] e a resistência térmica diminui. Quando há fluxo de calor, será criado um padrão térmico heterogêneo com diferentes temperaturas superficiais entre as regiões secas e húmidas [1].

Além disso, os materiais húmidos respondem mais devagar a mudanças na temperatura do ar do que os materiais secos. Com base nesse princípio, o aquecimento de uma superfície seca ocorre mais rapidamente do que o aquecimento de uma superfície húmida e a taxa de resfriamento na região seca também é maior do que em uma região húmida [1].

A TIV é uma técnica muito utilizada para identificar humidade e outros defeitos em edificações devido à facilidade de uso e ao baixo custo, tempo e esforço para a sua utilização [13]. Porém, apesar da sua aplicabilidade para detetar humidade, existe uma lacuna na literatura quanto à análise quantitativa que correlaciona diferenças na temperatura superficial com o teor de humidade devido à complexidade e variabilidade dos fenómenos envolvidos [11, 12, 14].

Nos últimos anos, a indústria da construção está vivenciando uma revolução tecnológica guiada pela digitalização e automação [15]. Vários estudos têm sido conduzidos para integrar os

resultados de tecnologias de inspeção em edificações com técnicas de machine learning e com softwares BIM, por meio do desenvolvimento de algoritmos que possibilitam automatizar a identificação de defeitos e da implementação dos resultados das técnicas de inspeção em modelos BIM, facilitando a visualização e identificação de defeitos e reduzindo a subjetividade na análise dos resultados das inspeções.

As técnicas baseadas em machine learning possuem grande potencial para análise e processamento de imagens térmicas [13, 16], contudo, apesar do aumento significativo do seu uso na engenharia civil, existem poucos estudos quanto ao uso dessas técnicas e ferramentas no campo de inspeções de edificações, especialmente em relação à análise de humidade.

Desta forma, este artigo tem como objetivos: (i) apresentar resultados preliminares de ensaios realizados com a TIV para a identificação de critérios indicativos de humidade em alvenarias de tijolos cerâmicos revestidos com argamassa em duas condições distintas de temperatura e humidade relativa ambiente; e (ii) apresentar os recentes avanços com o uso de machine learning para automatizar a identificação de defeitos em edificações e também os estudos sobre a integração dos resultados de técnicas de inspeção em modelos BIM para facilitar o diagnóstico e o monitoramento de defeitos em edificações.

2. Definição de critérios indicativos de humidade em alvenarias com a TIV

2.1. Materiais e métodos

Os experimentos laboratoriais para monitoramento de humidade com a TIV e o método gravimétrico (MG) foram conduzidos conforme as etapas constantes da Figura 1 - .

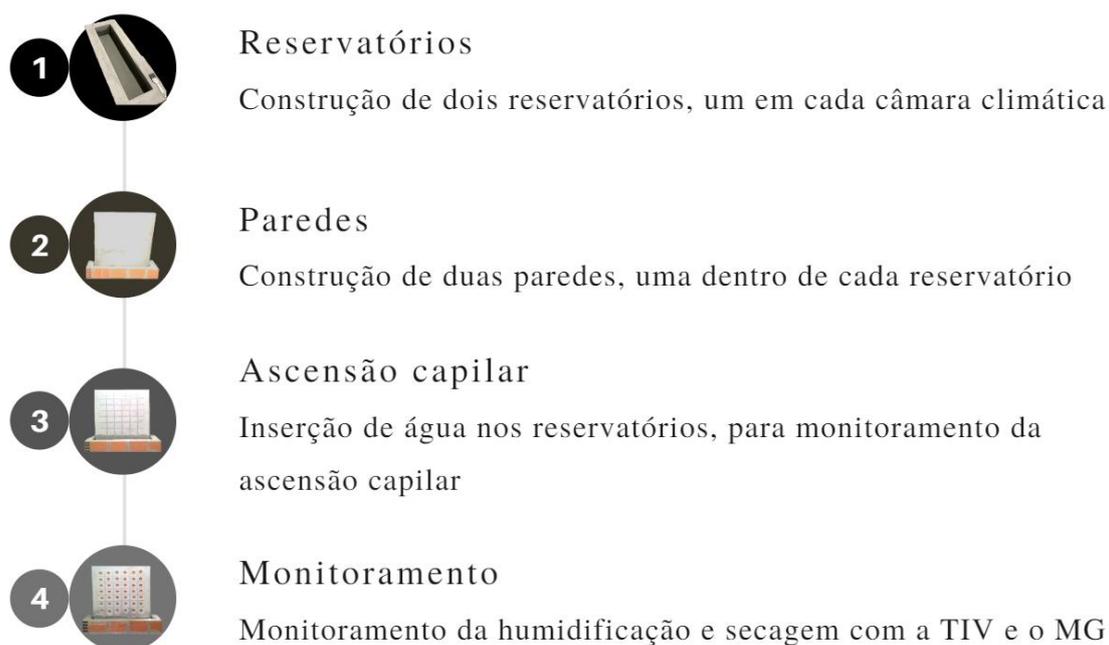


Figura 1 - Etapas dos experimentos laboratoriais.

Para esta campanha experimental, foram construídos e impermeabilizados dois reservatórios em duas câmaras climáticas diferentes. Em uma das câmaras, denominada de “câmara quente”, a temperatura e a humidade relativa foram ajustadas a aproximadamente 30°C e 60%, respetivamente. A outra câmara climática, denominada de “câmara fria”, foi ajustada com temperatura e humidade relativa de aproximadamente 15°C e 90%, respetivamente. Dentro de cada um dos reservatórios foi construída uma parede de dimensões de 0,93 m de largura por 0,99 m de altura, executada em tijolo cerâmico com dimensões de 9 x 19 x 29 cm³ e com revestimento feito em argamassa pré-doseada de espessura de 2 cm. As paredes não foram revestidas com argamassa até a cota de 13 cm, com o objetivo de acelerar a percolação da água por ascensão

capilar.

Em seguida, foram efetuados os ensaios para determinação da emissividade, segundo a norma ASTM E1933-99a [17], e para determinação da temperatura aparente refletida, conforme a ASTM E1862-97 [18]. Logo após, foram demarcados nas paredes os locais para monitoramento com a TIV e o MG e foi inserida água nos reservatórios para análise da percolação da água por ascensão capilar. Imediatamente após a fase de humidificação, iniciou-se a fase de secagem, nas mesmas condições ambientais. A Tabela 1 - contém o período total de monitoramento das fases de humidificação e secagem em cada uma das câmaras climáticas.

Tabela 1 - Período total de monitoramento em cada câmara.

	Câmara quente		Câmara fria	
	Humidificação	Secagem	Humidificação	Secagem
Tempo de monitoramento	359h	263h	387h	407h

Durante as fases de humidificação e secagem, foram efetuadas 12 e 11 medições, respetivamente, em ambas as paredes. No início de cada fase foram efetuadas medições com menor intervalo de tempo e com o decorrer do ensaio as medições ficaram mais espaçadas. Em cada tempo de monitoramento, foram tiradas uma imagem térmica e uma imagem digital e, em seguida, foram extraídos provetes de toda uma coluna (vertical), para análise da humidade com o MG.

A câmara de infravermelhos utilizada foi o modelo E40 da marca FLIR Systems, a qual possui resolução de infravermelhos de 160 x 120 pixels. Na Figura 2 - apresenta-se o esquema da realização dos ensaios dentro das câmaras climáticas. A metodologia de construção dos provetes, a especificação de equipamentos e materiais e o procedimento de realização dos experimentos laboratoriais constam de maneira mais detalhada em [19].

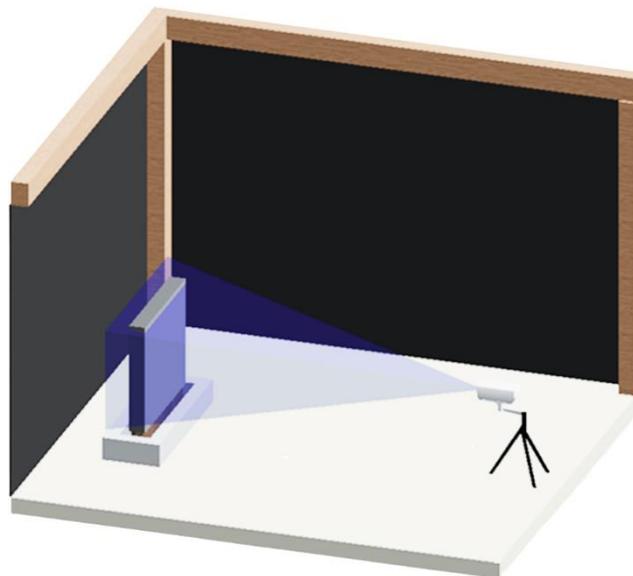


Figura 2 - Representação esquemática do layout dos experimentos laboratoriais

A análise da correlação entre o gradiente térmico identificado pela TIV entre as regiões húmidas e a região seca (ΔT) e o teor de humidade medido pelo método gravimétrico (u) foi feita por meio de uma análise de regressão. Em seguida, efetuou-se a análise da matriz de correlação entre as variáveis contínuas do ensaio, nomeadamente ΔT , “ u ” e fase. O objetivo da análise da correlação foi verificar se as variáveis são estatisticamente significativas entre si e qual é o grau da correlação linear entre estas. Posteriormente, fez-se a análise dos gráficos de dispersão dos pontos em cada uma das fases do ensaio (humidificação e secagem), com rótulo de dados de tempo, para analisar os valores de ΔT e “ u ” obtidos em cada momento do ensaio.

A análise de clusters de K-médias foi efetuada com o objetivo de agrupar os pontos de

acordo com as variáveis ΔT e “u”, para verificar os ΔT s indicativos de pontos com altos teores de humidade em cada um dos cenários de medição. A análise de clusters de K-médias foi precedida da análise de cluster hierárquico, para identificação do arranjo de clusters mais adequado.

2.2. Resultados e Discussão

Primeiramente, realizou-se a análise qualitativa dos resultados obtidos nos ensaios de humidificação e secagem das paredes situadas nas câmaras quente e fria. **A origem da referência não foi encontrada.** contém as imagens digitais e térmicas obtidas na fase de humidificação da parede situada na câmara quente com: (a) 2 horas; (b) 119 horas; e (c) 359 horas de ensaio. Com 2 horas de humidificação já foi possível visualizar um gradiente de temperatura entre a base da parede e a parte superior. Já com 119 horas de ensaio, o gradiente térmico foi superior àquele identificado ao final do ensaio, com 359 horas de medição. Ainda, ressalta-se que foram identificados gradientes térmicos em locais onde a humidade não era visível a olho nu nas fases de humidificação e secagem nas paredes localizadas em ambas as câmaras climáticas. As imagens digitais e térmicas referentes às demais etapas do ensaio constam de [19].

A análise de regressão efetuada para identificação do modelo mais adequado retornou os resultados de R^2 e os parâmetros das equações constantes da

e da **A origem da referência não foi encontrada.**, referentes aos ensaios com a parede da câmara quente e da câmara fria, respetivamente. **A origem da referência não foi encontrada.** contém os gráficos com as curvas de cada modelo de regressão. Os dados referentes às três primeiras medições efetuadas na humidificação da parede da câmara fria precisaram ser descartados devido a problemas de medição.

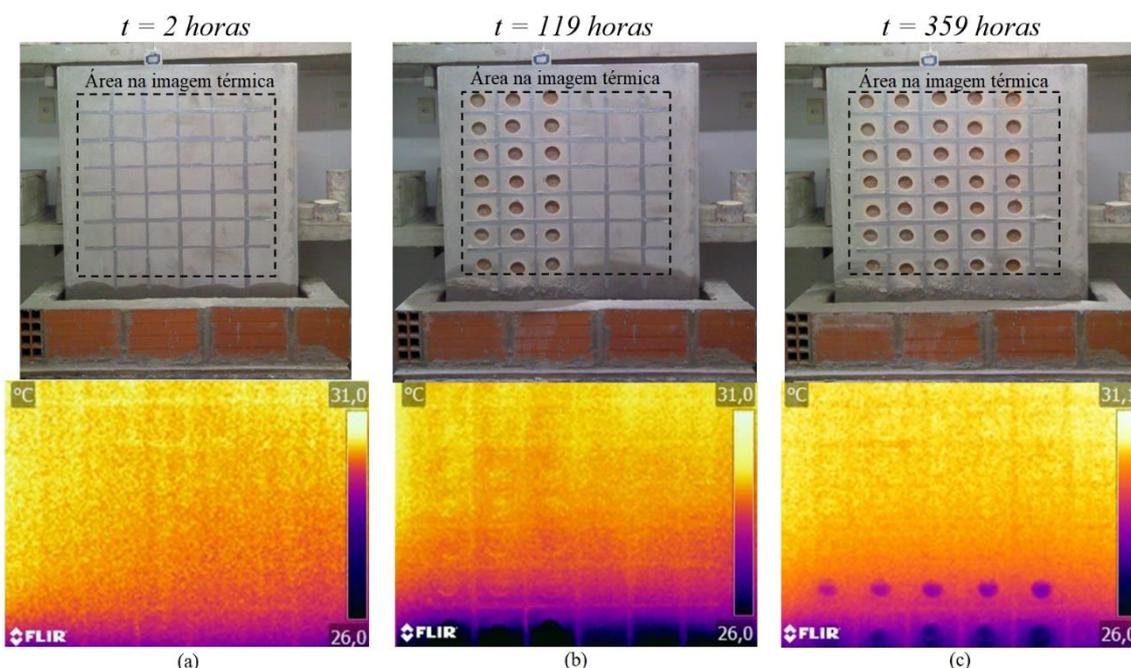


Figura 3 - Imagens digitais e térmicas da fase de humidificação da parede na câmara quente. (a) 2 horas de medição; (b) 119 horas de medição; (c) 359 horas de medição.

Tabela 2 - Valores de R^2 e estimativas de parâmetro para os modelos de regressão – parede câmara quente.

Modelo	Estimativas de parâmetro			
	R^2	Constante	b1	b2
Linear	0,689	-0,526	0,475	
Logarítmico	0,706	-0,992	1,837	
Quadrático	0,705	-1,522	1,052	-0,069
Potência	0,399	0,069	2,032	

Tabela 3 - Valores de R² e estimativas de parâmetro para os modelos de regressão – parede câmara fria.

Modelo	Estimativas de parâmetro			
	R ²	Constante	b1	b2
Linear	0,911	-0,368	0,125	
Logarítmico	0,905	-0,765	0,658	
Quadrático	0,913	-0,494	0,175	-0,004
Potência	0,710	0,001	3,579	

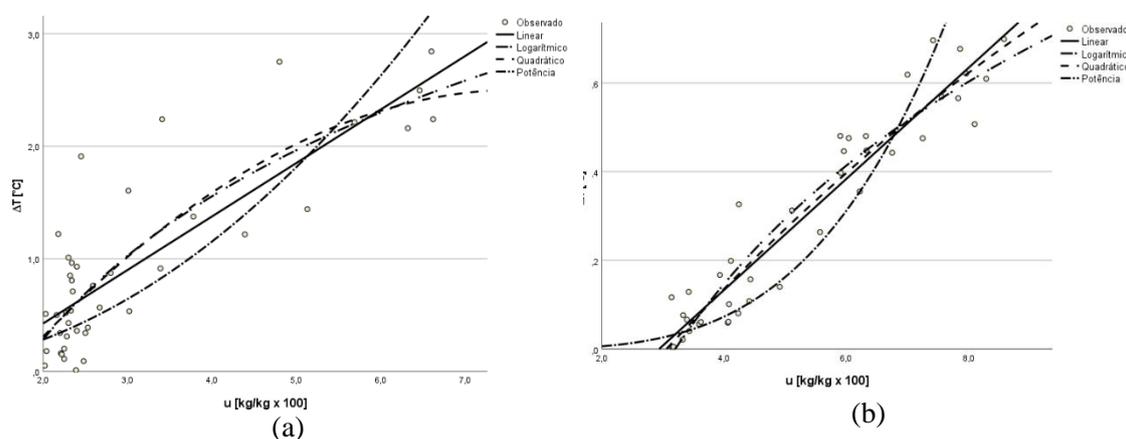


Figura 4 - Curvas de regressão. (a) Parede câmara quente; (b) Parede câmara fria.

Os modelos linear, logarítmico e quadrático apresentaram valores elevados de R² nos dois ensaios, sendo os resultados ligeiramente superiores para a parede localizada na câmara fria. Este facto pode estar relacionado com um eventual maior impacto da temperatura e humidade relativa do ar nos resultados. Para seleccionar, dos três modelos de regressão, qual o que melhor se ajusta às medições efetuadas, foi calculada a raiz do erro quadrático médio (RMSE) para análise da diferença entre os valores fornecido por cada modelo em relação aos valores observados. **A Erro! A origem da referência não foi encontrada.** contém as equações dos modelos que apresentaram os maiores valores de R² com menores valores de erro em cada um dos ensaios. Como o gradiente térmico depende das propriedades dos materiais e das condições ambiente (temperatura, humidade relativa, vento, dentre outras), ressalva-se que as equações apresentadas restringem-se às condições específicas desta campanha experimental.

Tabela 4 - Equação e parâmetros dos modelos de regressão seleccionados.

Parede	Modelo de melhor ajuste	Equação	R ²	RMSE
Câmara quente	Logarítmico	$\Delta T = 1,837\ln(u) - 0,992$	0,71	0,45
Câmara fria	Linear	$\Delta T = 0,125u - 0,368$	0,91	0,07

A Erro! A origem da referência não foi encontrada. e a

contêm as matrizes de correlações dos resultados nas câmaras quente e fria, respetivamente, efetuada com as variáveis contínuas do experimento. São apresentados o coeficiente de correlação de pearson (r) e o p-value. Os valores marcados com “***” indicam uma correlação linear estatisticamente significativa entre as duas variáveis, logo, constata-se que o ΔT apresentou uma correlação linear estatisticamente significativa e com altos valores com o “u” em todos os ensaios. A fase apresentou correlação estatisticamente significativa com o ΔT na parede da câmara quente, entretanto, com um baixo valor, o que indica que os valores de ΔT durante a fase humedificação divergiram ligeiramente dos valores de ΔT durante a fase de secagem nesta câmara.

Tabela 5 - Matriz de correlações das variáveis com coeficiente de pearson (r) e p-value – parede câmara quente.

		ΔT	u	Fileira	Coluna	Fase
ΔT	r	1				
	p-value	-				
u	r	0,83**	1			
	p-value	<0,001	-			
Fase	r	0,385**	0,264	-0,589**	0,034	1
	p-value	<0,001	0,091	<0,001	0,564	-

Tabela 6 - Matriz de correlações das variáveis com coeficiente de pearson (r) e p-value – parede câmara fria.

		ΔT	u	Fileira	Coluna	Fase
ΔT	r	1				
	p-value	-				
u	r	0,955**	1			
	p-value	<0,001	-			
Fase	r	-0,08	0,032	0,000	-0,134	1
	p-value	0,196	0,806	1,000	0,010	-

A **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**(a) retrata o gráfico de dispersão com os resultados da parede da câmara quente, separados conforme a fase (humidificação e secagem) e com rótulos do tempo de medição, em horas. Com 7 horas de humidificação, os valores de ΔT já haviam ultrapassado 1,0°C, mas o valor máximo de ΔT (2,8°C) foi obtido com 119 horas de ensaio, a partir de quando passou a diminuir, chegando a um valor ligeiramente inferior ao final do ensaio de humidificação (2,2°C). Em relação ao ensaio efetuado na parede situada na câmara fria (**Erro! A origem da referência não foi encontrada.**(b)), como as três primeiras medições foram descartadas, monitorou-se o ΔT a partir de 23 horas, momento em que este já apresentava valores superiores a 0,4°C. O ΔT máximo nesta câmara foi identificado também com 119 horas de medição (0,7°C), seguindo o mesmo padrão identificado na câmara quente e reduzindo ligeiramente até o final do ensaio de humidificação, chegando a 0,57°C ao final.

A análise de clusters foi efetuada com o objetivo de agrupar os dados de ΔT e “u” com características semelhantes, conforme consta da Figura 6. Foi definido o agrupamento em três clusters. Em seguida, efetuou-se uma análise descritiva exploratória para identificação dos valores de ΔT e “u” de cada cluster. A análise dos boxplots gerados possibilitou a identificação de outliers e, após a eliminação dos outliers, foram encontrados os resultados constantes da **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**

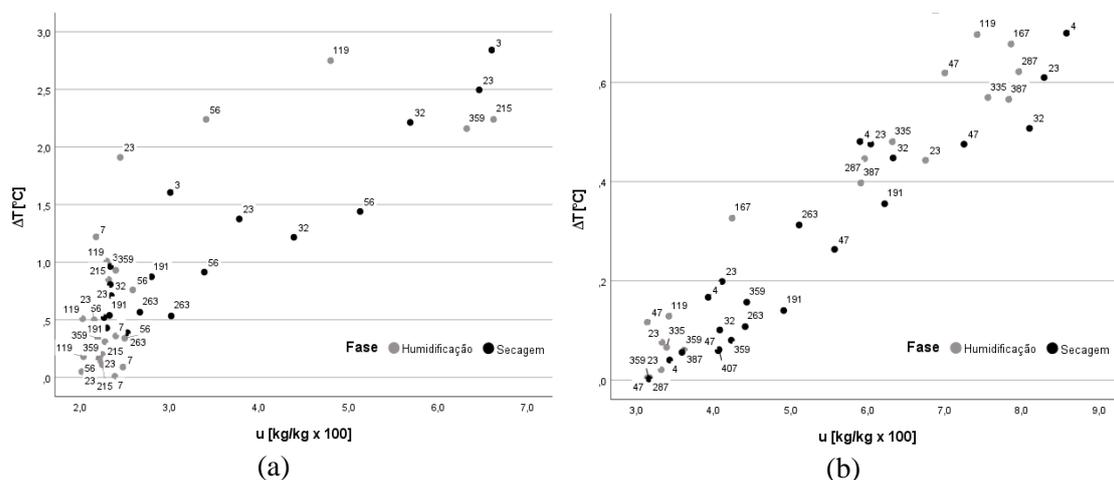


Figura 5 - Gráficos de dispersão dos pontos com rótulo de tempo [h]. (a) Parede câmara quente; (b) Parede câmara fria.

A

contém o limite inferior e superior de ΔT e “u” para cada um dos clusters, para um intervalo de confiança de 95%. Os valores sombreados em vermelho (cluster 1) indicam os valores de ΔT para pontos com teor de humidade elevado, enquanto os valores sombreados em amarelo (cluster 2) indicam os valores de ΔT para humidade intermédia e os valores sombreados em verde (cluster 3) indicam valores de ΔT para teores de humidade mais baixos. Para a parede na câmara quente, ΔT s acima de $1,06^{\circ}\text{C}$ indicam pontos com humidade intermédia e acima de $1,95^{\circ}\text{C}$ com humidade elevada, enquanto na câmara fria ΔT s acima de $0,40^{\circ}\text{C}$ já indicam humidade intermédia e acima de $0,55^{\circ}\text{C}$ indicam humidade elevada, o que mostra a grande influência das condições ambientais no gradiente térmico que indica locais húmidos. Como a humidade relativa na câmara fria era muito elevada (90%), ressalta-se que os provetes extraídos das regiões secas nesta câmara (sem humidade proveniente da água em ascensão capilar) apresentaram teores de humidade superiores àqueles identificados nos provetes das regiões secas na câmara quente.

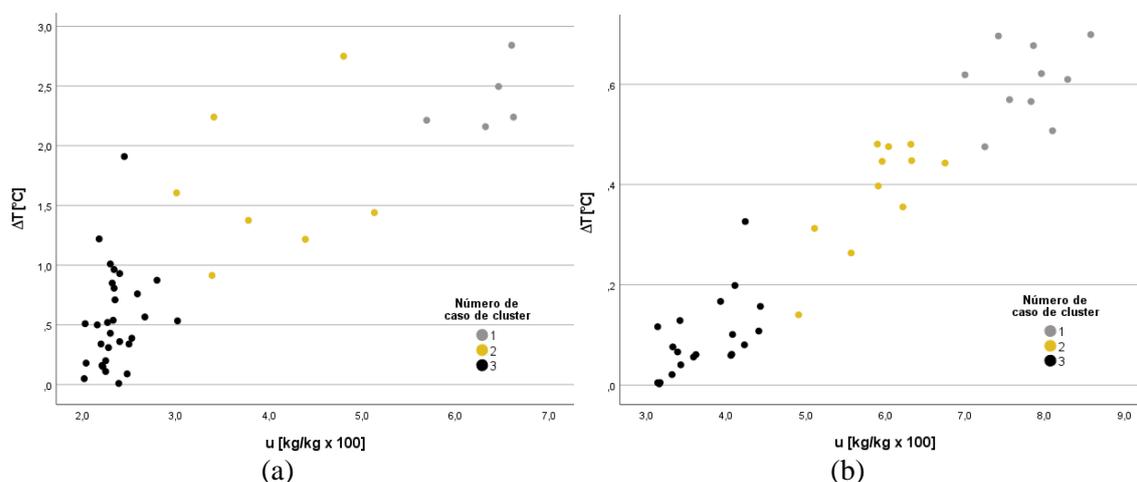


Figura 6 - Gráfico de dispersão dos clusters. (a) Parede câmara quente; (b) Parede câmara fria.

Tabela 7 - Limite inferior e superior do ΔT e “u” de cada cluster

Cluster		Parede câmara quente		Parede câmara fria	
		Limite inferior	Limite superior	Limite inferior	Limite superior
1	ΔT	1,95	2,92	0,55	0,66
	u	6,28	6,72	7,44	8,13
2	ΔT	1,06	1,65	0,40	0,48
	u	3,25	3,99	5,94	6,42
3	ΔT	0,34	0,61	0,05	0,11
	u	2,24	2,35	3,47	3,90

3. Automatização da identificação de defeitos e integração em modelos BIM

Na última década, o aumento do número de bases de dados com imagens, aliado ao avanço das ferramentas computacionais, contribuiu para o rápido desenvolvimento de técnicas de machine learning aplicadas à deteção de objetos e/ou determinadas características em imagens, abrindo caminho para a automatização do processo de inspeção visual de edifícios [20, 21]. As técnicas de machine learning permitem que o computador realize uma determinada tarefa de forma autónoma e automatizada, após um processo de aprendizagem, que pode ser supervisionado ou não supervisionado [16], o que justifica a grande tendência observada de pesquisas nessa área. Algumas das técnicas de machine learning atualmente utilizadas na área de inspeções na

engenharia civil são gradient boosting, SVM (support vector machines), redes neurais, modelos de análise de regressão e também abordagens mais recentes de deep learning [21-23].

Quanto às imagens térmicas obtidas com a TIV, o desenvolvimento de algoritmos de processamento de dados é de fundamental importância para mitigar o ruído das imagens e possibilitar a extração de informações que evidenciem os defeitos existentes [16]. Os algoritmos podem ser baseados tanto em parâmetros térmicos e princípios físicos de transferência de calor (como Pixel Algorithm for Time-Derivative of Temperature (PATDT), Partial Least Square Thermography (PLST), Pulse Phase Thermography (PPT) e Thermography Signal Reconstruction (TSR)), quanto em procedimentos matemáticos e analíticos (como Principal Component Thermography (PCT) e Dynamic Thermal Tomography (DTT)) [16]. Contudo, apesar dos bons resultados obtidos com esses algoritmos, nem todos são automatizados. A possibilidade de se conduzir inspeções de forma online e com interpretação automatizada dos dados é de grande interesse, visto que elimina a subjetividade e a dependência da experiência do operador [16, 24].

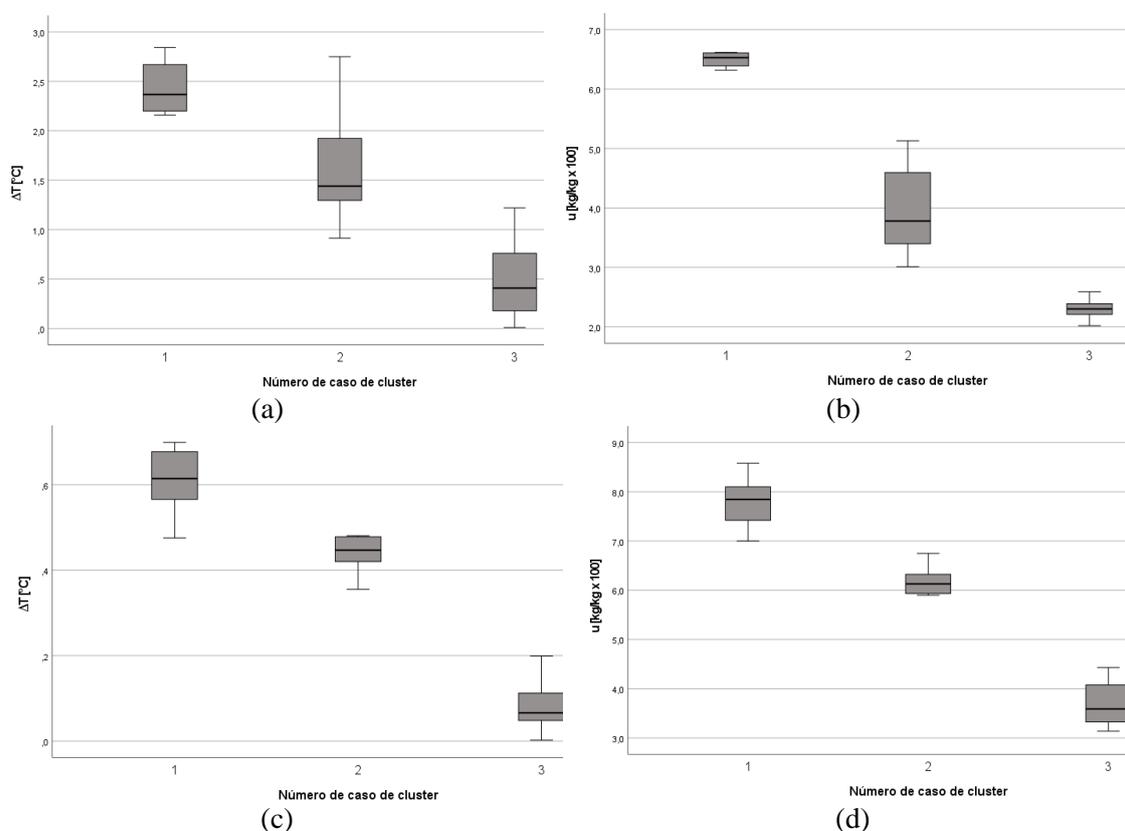


Figura 7 - Boxplots dos clusters. (a) ΔT clusters parede câmara quente; (b) "u" clusters parede da câmara quente; (c) ΔT clusters parede câmara fria; (d) "u" clusters parede câmara fria.

A Tabela 8 contempla algumas das pesquisas publicadas nos últimos anos com a utilização de algoritmos de processamento de dados e de machine learning para o diagnóstico de edificações e infraestruturas, bem como a informação da técnica utilizada para levantamento dos dados e a patologia ou característica estudada.

Os algoritmos, técnicas de processamento de imagens e técnicas de machine learning aplicados como ferramentas de diagnóstico já foram utilizados na detecção de defeitos como fissuras [20], fragmentações em betão [23], vazios [16, 25], na avaliação da eficiência energética das edificações [13, 26], no estudo de danos relacionados com a cor e geometria dos materiais [27, 28] e também na análise de humidade [22, 29, 30, 31]. Também foram identificados estudos que contemplaram a integração dos resultados provenientes das técnicas de inspeção em modelos BIM [27, 32].

Apesar de terem sido encontrados estudos cujo objetivo era a avaliação automatizada de

problemas relacionados com a humidade, grande parte destes aplicam-se a situações específicas, não podendo ser generalizados. Também não foram encontrados estudos que integrem em modelos BIM os algoritmos para automatização da identificação de humidade, para facilitar a inspeção e o monitoramento das edificações.

Tabela 8 - Trabalhos recentes com a utilização de *machine learning* e algoritmos de processamento de dados para inspeções na engenharia civil

Artigo	Técnica para levantamento dos dados	Algoritmos de processamento de dados/técnicas de <i>machine learning</i>	Patologia
[22]	<ul style="list-style-type: none"> Impedância Tomográfica Elétrica 	<ul style="list-style-type: none"> Regressão linear com SVM (LR-SVM) Regressão linear com mínimos quadrados (LR-LS) Rede neural artificial (ANN) 	Humidade
[29]	<ul style="list-style-type: none"> Método dielétrico, de micro-ondas e gravimétrico 	<ul style="list-style-type: none"> Rede neural artificial (ANN) 	Humidade
[30]	<ul style="list-style-type: none"> Impedância Tomográfica Elétrica 	<ul style="list-style-type: none"> Variação total (TV) Regressão de menor ângulo (LARS) Rede elástica (EN) Rede neural artificial (ANN) 	Humidade
[20]	<ul style="list-style-type: none"> Imagens obtidas com <i>drones</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Rede neural convolucional (CNN) para classificação de imagens com e sem fissuras Rede Neural U-Net para segmentação semântica de pixels de fissuras 	Fissuras
[23]	<ul style="list-style-type: none"> Imagens RGB 	<ul style="list-style-type: none"> Algoritmo para retirar ruídos da imagem e evidenciar defeitos Modelo de análise de regressão com técnicas de processamento de imagens 	Fragmentações em betão
[27]	<ul style="list-style-type: none"> GPR, imagens obtidas com drones, escaneamento a laser e TIV 	<ul style="list-style-type: none"> OBIA (<i>object-based image analysis</i>) KNN (<i>k-nearest neighbor</i>) 	Pátina, humidade, etc.
[28]	<ul style="list-style-type: none"> Escaneamento a laser e fotogrametria 	<ul style="list-style-type: none"> Algoritmo de regressão logística de classificação multi-classe 	Danos quanto à cor e geometria
[25]	<ul style="list-style-type: none"> Fotogrametria (SfM) Imagens obtidas com drone Termografia de Infravermelhos 	<ul style="list-style-type: none"> Transformação da matriz de temperatura em uma escala de cinzento Uso de ponderação de intensidade local (LIW) Método do Limite Otsu para dividir a imagem em fundo e primeiro plano (redução de pixels para análise) 	Defeitos sob a superfície
[13]	<ul style="list-style-type: none"> Termografia de Infravermelhos Imagens obtidas com drones 	<ul style="list-style-type: none"> Método Canny para deteção das bordas das regiões com defeitos CED (<i>canny based Edge Detection</i>) e DCI (<i>dominant color isolation</i>) <i>Mask</i> R-CNN para computar os valores de transmitância térmica 	Eficiência energética
[26]	<ul style="list-style-type: none"> Termografia de Infravermelhos 	<ul style="list-style-type: none"> Conversão das imagens térmicas para o formato pgm Algoritmo de deteção de linhas (<i>Line Segment Detector</i>) Conversão da imagem térmica em uma escala de cinzento 	Eficiência energética
[31]	<ul style="list-style-type: none"> Termografia de Infravermelhos 	<ul style="list-style-type: none"> Aplicação de técnica de filtragem bilateral Aplicação do Método do Limite Otsu Técnica de deteção de contornos (filtro termal e geométrico) 	Humidade
[16]	<ul style="list-style-type: none"> Termografia de Infravermelhos 	<ul style="list-style-type: none"> <i>Deep learning</i> - <i>Mask</i> R-CNN 	Vazios sob a superfície

4. Conclusões

Os resultados da campanha experimental permitiram concluir que existe uma forte correlação entre o teor de humidade dos provetes e o gradiente térmico entre o provete e a zona seca da parede. Os modelos linear, logarítmico e quadrático garantiram bons ajustes em ambos os ensaios (na câmara quente e na câmara fria), com coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,69, contudo, a equação do modelo de regressão que melhor se ajustou aos resultados obtidos na câmara quente foi completamente distinta da equação que melhor se ajustou aos resultados da câmara fria.

Com a análise de clusters, identificaram-se três grupos distintos em cada um dos ensaios: um com teores de humidade mais elevados, outro com teores intermédios e outro com valores mais baixos. O agrupamento dos pontos apontou que, na câmara quente, pontos com altos teores de humidade apresentaram gradientes térmicos entre 2,0 e 3,0°C, mas que gradientes a partir de 1,0°C já indicaram locais com teores de humidade intermédios (superiores àqueles verificados na região não atingida pela percolação da água por ascensão capilar). Na câmara fria, os gradientes térmicos referentes aos pontos com elevados teores de humidade atingiram valores entre 0,5 e 0,7°C, mas gradientes acima de 0,4°C já indicaram regiões com teores de humidade intermédios. Em face do exposto, verifica-se uma diferença substancial entre os resultados encontrados, indicando a grande influência das condições ambientais nos resultados obtidos com a TIV.

Em face do grande potencial da TIV para inspeção de defeitos relacionados à humidade, mas considerando a grande variabilidade dos resultados obtidos com essa técnica e a subjetividade inerente às inspeções, foram também citadas neste artigo as técnicas que possibilitam o processamento dos dados provenientes das imagens térmicas, permitindo a redução do ruído e o realce das regiões com defeitos. Ainda, foram citados trabalhos publicados na área da engenharia civil para inspeção e monitoramento de defeitos em edificações e infraestrutura com a utilização de técnicas de machine learning, como redes neurais (ANN, CNN), regressões (LR-SVM, LR-LS, LARS), redes elásticas e clustering (KNN), além de técnicas de deep learning, como Mask R-CNN.

A incorporação de soluções que envolvem inteligência artificial tem sido cada vez mais comum na indústria da construção e o desenvolvimento dessas tecnologias digitais podem auxiliar na obtenção de diagnósticos mais confiáveis e na redução da dependência da experiência do operador. Portanto, pesquisas futuras devem considerar o uso dessas ferramentas aplicadas à análise de humidade e também a integração destas em modelos BIM, para automatizar e facilitar o monitoramento de defeitos em edificações.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado por: Financiamento Base - UIDB/04708/2020 da Unidade de Investigação CONSTRUCT - Instituto de I&D em Estruturas e Construções - financiada por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC).

Referências

- [1] E. Barreira, R. M. S. F. Almeida, *Infrared Thermography for Building Moisture Inspection*, Springer, Suíça, 2019.
- [2] C. Morón, D. Ferrández, P. Saiz, E. Yedra, Measuring system of capillary rising damp in cement mortars, *Measurement*, 135 (2019) 252–259. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.11.071>.
- [3] F. M. A. Henriques, *Humidade em paredes*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa 1994.
- [4] L. Kempton, G. Kokogiannakis, P. Cooper, Mould risk evaluations in residential buildings via site audits and longitudinal monitoring, *Build. and environ.*, 191 (2021) 107584. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107584>.

- [5] B. Vásárhelyi. Statistical Analysis of the Influence of Water Content on the Strength of the Miocene Limestone, *Rock Mech. and Rock Engineering.*, Springer Nature, Austria, 38 (2005) 69-76. <https://doi.org/10.1007/s00603-004-0034-3>.
- [6] N. Sathiparan, U. Rumeskumar, Effect of moisture condition on mechanical behavior of low strength brick masonry, *J. of Build. Engineering*, 17 (2018) 23-31. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.01.015>.
- [7] E. Rosina. When and how reducing moisture content for the conservation of historic building. A problem solving view or monitoring approach?, *J. of Cultural hérit.*, 31 (2018) S82–S88. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.03.023>.
- [8] N. P. Avdelidis, A. Moropoulou, P. Theoulakis, Detection of water deposits and movement in porous materials by infrared imaging, *Infrared phys. & Technology*, 44 (2003) 189-190. [https://doi.org/10.1016/S1350-4495\(02\)00212-8](https://doi.org/10.1016/S1350-4495(02)00212-8).
- [9] A. Hola, Measuring of the moisture content in brick walls of historical buildings – the overview of methods, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 251 (2017) 012067.
- [10] T. S. Jing, M. A. Othuman Mydina, N. Utaberta, Appraisal of moisture problem of inheritance building envelope assemblies via visible and infrared thermography methods, *J. Teknologi*, 75:5 (2015), 1–6. <https://doi.org/10.11113/jt.v75.4951>.
- [11] E. Grinzato, N. Ludwig, G. Cadelano, M. Bertucci, M. Gargano, P. Bison, Infrared thermography for moisture detection: A laboratory study and in-situ test, *Mater. Evaluation*, 69(1) (2011), 97–104.
- [12] E. Rosina, N. Ludwig, Optimal thermographic procedures for moisture analysis in building materials, In: *Proceedings SPIE – Diagnostic Imaging Technologies and Industrial Applications*, 3827 (1999). <https://doi.org/10.1117/12.361015>.
- [13] D. Sadhukhana, S. Peri, N. Sagunaraj, A. Biswas, D. F. Selvaraj, K. Koiner, A. Rosener, M. Dunlevy, N. Goveas, D. Flynn, P. Ranganathan, Estimating surface temperature from thermal imagery of buildings for accurate thermal transmittance (U-value): A machine learning perspective, *J. of Build. Engineering*, 32 (2020) 101637. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101637>.
- [14] E. Barreira, R. M. S. F. Almeida, J. M. P. Q. Delgado, Infrared thermography for assessing moisture related phenomena in building components, *Construction and Build. Mater.*, 110 (2016), 251-269. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.026>.
- [15] M. Q. Huang, J. Ninié, Q. B. Zhang, BIM, machine learning and computer vision techniques in underground construction: Current status and future perspectives, *Tunn. and Undergr. Space Technology* 108 (2021) 103677. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103677>.
- [16] I. Garrido, J. Erazo-Aux, S. Laguela, S. Sfarra, C. Ibarra-Castanedo, E. Pivarciova, G. Gargiulo, X. Maldague, P. Arias, Introduction of Deep Learning in Thermographic Monitoring of Cultural Heritage and Improvement by Automatic Thermogram Pre-Processing Algorithms, *Sensors*, 21 (2021). <https://doi.org/10.3390/s21030750>.
- [17] American Society for Testing and Materials (ASTM). ASTM E1933-99a: Standard Test Method for Measuring and Compensating for Emissivity Using Infrared Imaging Radiometers. Estados Unidos, 1999, 3p.
- [18] American Society for Testing and Materials (ASTM). ASTM E1862-97: Standard Test Method for Measuring and Compensating for Reflected Temperature Using Infrared Imaging Radiometers. Estados Unidos, 1997, 3p.
- [19] L. C. M. Dafico, E. Barreira, R. M. S. F. Almeida, H. Carasek, Comparison of Infrared Thermography and Other Traditional Techniques to Assess Moisture Content of Wall Specimens, *Sensors*, 22 (2022). <https://doi.org/10.3390/s22093182>.
- [20] K. Chen, G. Reichard, X. Xu, A. Akanmu, Automated crack segmentation in close-range building façade inspection images using deep learning techniques, *J. of Build. Engineering*, 43 (2021) 102913. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102913>.
- [21] A. Sawhney, M. Riley, J. Irizarry, *Construction 4.0 – An Innovation Platform for the Built Environment*, Routledge Taylor & Francis Group, Londres e Nova York, 2020.

- [22] T. Rymarczyk, G. Klosowski, A. Hola, J. Sikora, T. Wolowiec, Comparison of machine learning methods in electrical tomography for detecting moisture in building walls, *Energies*, 14 (2021) 2777. <https://doi.org/10.3390/en14102777>.
- [23] T. Dawood, Z. Zhu, T. Zayed, Machine vision-based model for spalling detection and quantification in subway networks, *Automation in Construction*, 81 (2017) 149-160. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.06.008>.
- [24] I. G. Garrido. Automation of the thermographic inspection: Development of thermogeometric algorithms for detection of pathologies supported by machine learning strategies, Tese de Doutoramento, Universidade Vigo, Vigo, Espanha, 2021.
- [25] M. Puliti, G. Montaggioli, A. Sabato, Automated subsurface defects' detection using point cloud reconstruction from infrared images, *Automation in Construction*, 129 (2021), 103829. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103829>.
- [26] S. Laguela, L. Díaz-Vilariño, J. Martínez, J. Armesto, Automatic thermographic and RGB texture of as-built BIM for energy rehabilitation purposes, *Automation in Construction*, 31 (2013) 230-240. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.12.013>.
- [27] M. Solla, L. M. S. Gonçalves, G. Golçalves, C. Francisco, I. Puente, P. Providência, F. Gaspar, H. Rodrigues, A Building Information Modeling Approach to Integrate Geomatic Data for the Documentation and Preservation of Cultural Heritage, *Remote Sens.*, 12 (2020), 4028. <https://doi.org/10.3390/rs12244028>.
- [28] E. Valero, A. Forster, F. Bosché, E. Hyslop, L. Wilson, A. Turmel, Automated defect detection and classification in ashlar masonry walls using machine learning, *Automation in Construction*, 106 (2019) 102846. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102846>.
- [29] A. Hola, L. Sadowski, Non-destructive in situ identification of the moisture content in saline brick walls using artificial neural networks, In: *Proceedings of the Creative Construction Conference*, (2019) 012. <https://doi.org/10.3311/CCC2019-012>.
- [30] T. Rymarczyk, G. Klosowski, A. Hola, J. Hola, J. Sikora, P. Tchórzewski, L. Skowron, Historical buildings dampness analysis using electrical tomography and machine learning algorithms, *Energies*, 14 (2021), 1307. <https://doi.org/10.3390/en14051307>.
- [31] I. Garrido, S. Laguela, S. Sfarra, F. J. Madruga, P. Arias, Automatic detection of moistures in different construction materials from thermographic images, *J. of Therm. Analysis and Calorim.*, 138 (2019), 1649-1668. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08264-y>.
- [32] Y. H. Tsai, J. Wang, W. T. Chien, C. Y. Wei, X. Wang, S. H. Hsieh, A BIM-based approach for predicting corrosion under insulation, *Automation in Construction*, 107 (2019) 102923. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102923>.

ORCID

L. C. M. Dafico	0000-0003-3650-7818 (https://orcid.org/0000-0003-3650-7818)
E. Barreira	0000-0002-1343-5578 (https://orcid.org/0000-0002-1343-5578)
R. M.S.F. Almeida	0000-0002-9846-6081 (https://orcid.org/0000-0002-9846-6081)
R. S. Vicente	0000-0002-5456-1642 (https://orcid.org/0000-0002-5456-1642)

Avaliação de desempenho de argamassas auto-compactáveis com óxido de grafeno

Performance evaluation of self-compacting mortars with graphene oxide

I. Junior^a, P. R. da Silva^{a,b†}, L. Evangelista^{a,b}

^a Instituto Politécnico de Lisboa, ISEL, Departamento de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal

^b Civil Engineering Research and Innovation for Sustainability - CERIS, IST, UL, Lisboa, Portugal

[†] silvapm@dec.isel.pt

RESUMO

Neste artigo, pretende-se avaliar a viabilidade de produzir argamassas auto-compactáveis (AAC) com recurso a óxido de grafeno (OG). Será avaliado o desempenho de diversas argamassas em que a pasta ligante tradicional, composta com cimento Portland (C) e cinzas volantes das centrais termoelétricas (CV), será reforçada pelo OG e estabelecidas as relações constitutivas que permitam a futura utilização deste tipo de material sem reservas quanto ao desempenho esperado. Actualmente, a reparação e reabilitação de estruturas de betão tem um papel de destaque na indústria da construção e as AAC desempenham um papel vital nesses trabalhos. O cimento, assim como os demais constituintes destas AAC, devem ser cuidadosamente seleccionados, a fim de se obter uma composição adequada com uma mistura granular tão compacta quanto possível e com bom desempenho tanto no estado fresco, como no estado endurecido. O OG é muito reactivo, devido essencialmente à sua elevada superfície específica e apresenta elevado potencial na melhoria das propriedades dessas AAC, principalmente ao nível do seu comportamento mecânico. Desse modo, o presente trabalho tem como principal objectivo avaliar o desempenho das AAC, tanto no estado fresco (auto-compactabilidade) como no estado endurecido (comportamento mecânico e durabilidade), em misturas binárias e ternárias de C, CV e OG. Foram realizadas 6 misturas, nomeadamente: [100%C]; [100%C+0.02%OG]; [100%C+0.06%OG]; [70%C+30%CV]; [70%C+30%CV+0.02%OG]; [70%C+30%CV+0.06%OG]. Os resultados obtidos permitiram verificar que a utilização de OG contribuiu para o decréscimo das propriedades das AAC no estado fresco. No entanto, os resultados obtidos demonstram indicadores promissores no que respeita ao comportamento mecânico das misturas estudadas.

ABSTRACT

In this paper, we intend to evaluate the viability of producing self-compacting mortars (SC_{mortar}) using graphene oxide (GO). The performance of different mortars will be evaluated. For these mortars, the traditional binder, composed of Portland cement (C) and fly ash from thermoelectric power stations (FA), will be reinforced by GO, establishing the constitutive relations that allow the future use of this type of material without reservations regarding expected performance. Currently, the repair and rehabilitation of concrete structures has a prominent role in the construction industry and SC_{mortar} play a vital role in this work. The cement, as well as the other constituents of these SC_{mortar} , must be carefully selected to obtain an adequate composition with a granular mixture as compact as possible and with good performance both in the fresh and in the hardened state. GO is very reactive, essentially due to its high specific surface and has a high potential for

Palavras-chave:

Argamassas auto-compactáveis;
Óxido de grafeno;
Comportamento mecânico;
Durabilidade.

Keywords:

Self-compacting mortars;
graphene oxide;
mechanical properties;
Durability.

improving the properties of these $SC_{mortars}$, mainly in terms of their mechanical behaviour. Thus, the main objective of this work is to evaluate the performance of $SC_{mortars}$, both in the fresh (self-compactability) and in the hardened state (mechanical behaviour and durability), in binary and ternary mixes of C, FA and OG. Six mixes were produced, namely: [100%C]; [100%C+0.02%GO]; [100%C+0.06%GO]; [70%C+30%FA]; [70%C+30%FA+0.02%GO]; [70%C+30%FA+0.06%GO]. The results obtained allowed to verify that the use of GO contributed to the decrease of the $SC_{mortars}$ properties in the fresh state. However, the results obtained demonstrate promising indicators regarding the mechanical behaviour of the mixes studied.

1. Introdução

Para aumentar a fluidez e a estabilidade das argamassas auto-compactáveis (AAC) é necessário um maior teor de finos incluindo necessariamente o cimento. Para esse efeito, são utilizados habitualmente diversos materiais tais como fíleres inertes ou adições pozolânicas. Existe, no entanto, o interesse de, mantendo propriedades de elevado desempenho destas argamassas, diminuir o consumo de cimento ou pelo menos não o aumentar utilizando para esse efeito nanomateriais como por exemplo o óxido de grafeno (OG).

Existe, portanto, um interesse significativo em verificar a viabilidade e validar a produção de AAC com a introdução do referido nanomaterial, de modo a oferecer à indústria um produto de elevado desempenho que dê resposta às actuais exigências dos materiais de reabilitação e que, em simultâneo, possibilite diminuir o consumo de cimento.

A utilização de OG na produção de argamassas e / ou betões apresenta-se como uma potencial mais-valia em termos da sua interacção com a matriz cimentícia, necessitando, no entanto, de mais investigação [1]. As características únicas do OG, como por exemplo a sua superfície áspera, têm uma influência favorável sobre no comportamento mecânico da pasta de cimento. Com a utilização de pequenas quantidades de OG, tão pouco quanto 0,05% (da massa de cimento) é possível aumentar a resistência à compressão em 15–33% e a resistência à flexão em 41–59%, respectivamente [2]. As propriedades superlativas do óxido de grafeno conferem-lhe um futuro promissor quando combinado com cimento, formando um nanocompósito [3-4]. O módulo de elasticidade do OG é estimado em aproximadamente 1 TPa [5]. He e Shi [6] referem que a incorporação de OG na mistura de cimento melhorou a resistência à penetração de cloretos e a resistência ao transporte de iões. É igualmente expectável que a adição de OG a argamassas de cimento aumente a sua resistência ao transporte de fluidos e ao ataque de químicos [7].

Relativamente à influência do OG nas propriedades no estado fresco de argamassas e pastas de cimento é de salientar o trabalho de Wang et al. [8], que verificaram que com o aumento da dosagem de OG a fluidez e o tempo de presa das pastas de cimento diminuíram, mas a viscosidade aumentou. Especialmente, quando a adição de OG é de até 0,03%, há uma mudança evidente na fluidez, viscosidade e tempo de presa. O referido comportamento demonstra que a adição de OG pode tornar as pastas de cimento mais espessas e pode acelerar o processo de hidratação do cimento. Segundo os autores [8], a diminuição da fluidez e o aumento da viscosidade podem ser atribuídos ao efeito da dimensão nanométrica e superfície específica do OG. A elevada superfície específica conjugada com grupos funcionais de OG contendo oxigénio podem contribuir para o aumento da sua interacção com o cimento hidratado.

Lv et al. [9] produziram diversas pastas de cimento com diferentes proporções de OG, C e superplastificante e verificaram que por cada aumento de 0,01% de OG foi necessário aumentar em 0,03% a quantidade de C de modo a manter a fluidez relativamente à mistura de referência. Nesse sentido, os autores analisaram os efeitos da razão C/OG na fluidez e verificaram que há uma ligeira melhoria na fluidez quando comparada com a mistura de referência. Os autores referem igualmente que a utilização do superplastificante pode eliminar os efeitos negativos do OG na fluidez da pasta de cimento.

Lv et al. [3], avaliaram a resistência à compressão, à flexão e à tracção com a adição de OG em 0,01%, 0,02%, 0,03%, 0,04% e 0,05% em relação à massa de cimento e concluíram que a

resistência à tracção e à flexão aumentaram com o aumento da dosagem de OG até 0,03%. À medida que aumentou a dosagem de OG acima dos 0,03%, os autores referem que as resistências à tracção e flexão diminuíram de modo gradual. As resistências à tracção e à flexão com 0,03% de OG (aos 28 dias de idade) aumentaram 78,6% e 60,7%, respectivamente, o que é significativamente superior aos valores apresentados pela mistura de referência (sem OG). A resistência à compressão aumentou até aos 0,05% de OG, representando aos 28 dias um aumento de 47,9% relativamente à mistura sem OG.

Sun et al. (2020) [10] analisaram igualmente a resistência à flexão e à compressão de argamassas com diferentes proporções de OG, tendo, no entanto, obtido resultados significativamente inferiores aos reportados por Lv et al. [3]. Os autores referem aumentos de 6,25% relativamente à resistência à flexão e 13,23% para a resistência à compressão nas misturas optimizadas com OG em comparação à mistura de referência.

Para as propriedades de durabilidade verifica-se que existem menos trabalhos publicados e que a variabilidade dos resultados é superior ao observado para as propriedades mecânicas. É ainda de destacar o número limitado de estudos sobre o comportamento do OG em misturas binárias de cimento e cinzas volantes.

Nesse sentido, pretende-se avaliar a viabilidade de produzir AAC de elevado desempenho, através da adição de OG. Com estas AAC, pretende-se não só atingir um elevado desempenho relativamente ao comportamento mecânico e à durabilidade como também melhorar o desempenho ambiental da produção deste tipo de materiais de construção. Em resumo, a utilização de OG trará benefícios em termos do desempenho das AAC bem como em termos ambientais ao reduzir a extracção de matéria-prima para a produção de AAC bem como reduzir as emissões de CO₂ causadas pelo seu processo de produção.

2. Descrição da campanha experimental

2.1. Materiais utilizados

Foram utilizados os seguintes materiais:

- um tipo de cimento de acordo com a NP EN 197-1 (Cimento Portland tipo I-52,5 R, com massa volúmica de 3,20 kg/dm³) e uma adição, cinza volante (CV) de acordo com as NP EN 450-1 e NP EN 450-2, com massa volúmica de 2,30 kg/dm³; as granulometrias médias do C e da CV foram de 25 µm e 20 µm, respectivamente;
- duas areias siliciosas de acordo com a NP EN 12620, uma areia grossa (0/4) com massa volúmica de 2,55 kg/dm³, módulo de finura de 3,70 e absorção de água de 1,10% e uma areia fina (0/1) com massa volúmica de 2,58 kg/dm³, módulo de finura de 2,03 e absorção de água de 0,70%;
- um superplastificante (S_p) de elevado desempenho, forte redutor de água, de acordo com as NP EN 934-1 e NP EN 934-2 (uma combinação de policarboxilatos modificados, em solução aquosa com massa volúmica de 1,07 kg/dm³);
- água da rede pública de acordo com a NP EN 1008;
- óxido de grafeno fornecido pela Sigma-Aldrich, com uma dispersão em água de 4 mg/ml.

2.2. Quantidades de amassadura

As quantidades de amassadura apresentadas na Tabela 1 foram obtidas de acordo com o método proposto por Nepomuceno et al. [11-13]. Foram produzidas 6 misturas, 3 só com C e OG e 3 com C, CV e OG:

- C0 = 100% C
- C2 = 100% C + 0,02% OG
- C3 = 100% C + 0,06% OG
- CV0 = 70% C + 30% CV
- CV2 = 70% C + 30% CV + 0,02% OG
- CV6 = 70% C + 30% CV + 0,06% OG

O OG foi calculado em relação à massa de cimento e a água de diluição foi subtraída à água

de amassadura.

Tabela 1 - Quantidades de amassadura

Mat. const. [kg/m ³]	C0	C2	C6	CV0	CV2	CV6
Cimento	350	350	350	245	245	245
CV	---	---	---	53	53	53
S _p	5,9	6,4	6,4	5,4	5,9	5,9
Água	270	270	270	282	282	282
Areia Fina 0/1	761	761	761	759	758	758
Areia Grossa 0/4	758	758	758	756	755	755
OG [mg/m ³]	---	122,5	367,5	---	85,8	257,3
Água/Cimento	0,77	0,77	0,77	1,15	1,15	1,15
Água/Material Cimentício	0,77	0,77	0,77	0,95	0,95	0,95

2.3. Ensaio e preparação de provetes

Ensaio de espalhamento no mini-cone: A determinação do diâmetro médio de espalhamento através do ensaio de espalhamento com recurso a um molde tronco cónico, permite a determinação do parâmetro G_m . neste ensaio, o valor obtido do diâmetro médio de espalhamento (D_m) é expresso através de uma área de espalhamento relativa (G_m) utilizando o método proposto por Okamura et al. [14].

$$G_m = \left(\frac{D_m}{D_0}\right)^2 - 1 \quad (1)$$

em que:

G_m = área de espalhamento relativa;

D_m = diâmetro médio de espalhamento, em mm;

D_0 = diâmetro inicial na base do cone, em mm.

Ensaio de escoamento no mini-funil-V: A determinação do tempo de escoamento através do ensaio de fluidez no mini-funil V, permite o cálculo do parâmetro R_m . Neste ensaio, o resultado obtido pode ser apresentado directamente pelo tempo de escoamento (t), medido em segundos. Pode, no entanto, determinar-se a velocidade relativa de escoamento R_m , utilizando tal como no ensaio de espalhamento o método desenvolvido por Okamura et al. [14]:

$$R_m = \frac{10}{t} \quad (2)$$

em que:

R_m = velocidade relativa de escoamento, em s⁻¹;

t = tempo de escoamento, em segundos.

Ensaio de compressão e de flexão: Os ensaios de compressão e de flexão foram realizados de acordo com os procedimentos descritos na NP EN 1015-11, aos 7, 28 e 91 dias de idade, em 3 provetes prismáticos de 160 x 40 x 40 mm por cada mistura e idade. Os referidos provetes são inicialmente ensaiados à flexão, sobrando deste ensaio duas metades sensivelmente iguais que foram ensaiadas à compressão.

Ensaio de capilaridade: o ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado com base no procedimento descrito na EN 13057, aos 28 e 91 dias de idade, durante 72 horas de ensaio, em 3 provetes prismáticos de 160 x 40 x 40 mm. A absorção por capilaridade no tempo t_i é calculada dividindo o aumento da massa pela área da face do provete que esteve em contacto com a água. A absorção de água por capilaridade pode ser expressa em g/cm² para cada tempo t_i .

$$Abs_{capilar} = \frac{M_i - M_0}{A} \quad (3)$$

em que:

M_i = massa do provete no tempo t_i , em g;

M_0 = massa do provete no tempo t_0 , em g;

A = área da face do provete que esteve em contacto com a água, em cm^2 .

3. Apresentação e análise de resultados

3.1. Resultados no estado fresco

No que diz respeito aos resultados referentes ao estudo das AAC no estado fresco, é de salientar o facto de esses resultados constituírem, só por si, um objectivo a atingir. Por outras palavras, as amassaduras foram estudadas e realizadas, com as variações de composição ao nível da quantidade de água e de superplastificante, de modo a permitir o estudo das AAC em misturas com C, CV e OG, mas também a obter um material com um determinado comportamento no estado fresco, isto é, a auto-compactabilidade requerida às AAC.

Enquanto, numa argamassa convencional, é necessário a aplicação de uma energia adicional à fricção interna entre as partículas como modo de as “ajudar” a se distribuírem e preencherem correctamente os moldes, numa AAC tal não pode acontecer porque tem de ser a própria argamassa a conseguir tal efeito. Esse efeito reflecte-se evidentemente nos ensaios no estado fresco e consegue-se com recurso a um correcto dimensionamento das quantidades dos seus constituintes, de acordo com o proposto por Nepomuceno et al. [11-13].

O comportamento da AAC no estado fresco depende de inúmeros factores. Importa, no entanto, referir que a correlação entre os valores obtidos nos vários ensaios se reveste de alguma dificuldade porque os resultados desses ensaios eram já por si um objectivo a atingir. Ou seja, a análise dos resultados no estado fresco a seguir apresentada permite constatar que a totalidade das amassaduras executadas pode ser considerada auto-compactável e as variações observadas nas 2 famílias de argamassas (100%C e 70%C+30%CV) estão directamente relacionadas com a introdução do OG.

São apresentados, na Tabela 2 e na Figura 1 os resultados obtidos no estado fresco, nomeadamente, os parâmetros espalhamento no mini-cone (D_m), área de espalhamento relativa (G_m), tempo de escoamento no mini-funil (t) e velocidade relativa de escoamento (R_m).

Os resultados apresentados relativamente ao mini-cone permitem essencialmente avaliar o diâmetro de espalhamento das AAC. É possível observar que, os resultados obtidos por todas as misturas podem ser considerados satisfatórios, variando entre 210 e 275 mm. Em geral, é possível constatar uma boa distribuição do agregado (areia), sendo de notar a não ocorrência de exsudação nem de segregação. Pode-se ainda observar a presença de agregado mesmo no limite de espalhamento.

Tabela 2 - Resultados no estado fresco

Mistura	Espalhamento no mini-cone			Escoamento no mini-funil		
	D_m [mm]	Δ_{Ref}	G_m	t [s]	Δ_{Ref}	R_m [s^{-1}]
C0	259,35	---	5,73	9,78	---	1,02
C2	228,00	-12,09	4,20	9,20	-5,95	1,09
C6	210,90	-18,68	3,45	8,51	-13,01	1,18
CV0	273,60	---	6,49	11,04	---	0,91
CV2	257,50	-5,88	5,63	10,35	-6,25	0,97
CV6	233,70	-14,58	4,46	9,48	-14,13	1,05

A influencia do OG no espalhamento é notória e representa uma perda de trabalhabilidade entre 12% e 19 % nas misturas com 100%C e entre 5% e 15 % nas misturas com 70%C+30%CV. O comportamento observado pode ser atribuído à elevada superfície específica do OG que quando adicionado nas argamassas pode provocar a aglomeração das partículas de cimento e desse modo fomenta a formação de flóculos que naturalmente vão limitar a trabalhabilidade das misturas [8, 15].

Analisando os resultados obtidos verifica-se igualmente que a perda de trabalhabilidade é menor nas misturas com CV. Este facto pode ser devido a dois factores:

- Por um lado, as CV são partículas esféricas com menor necessidade de água, que funcionam

como “esferas” entre as partículas de cimento, aumentando, desse modo, a fluidez da mistura;

- Por outro lado, devido à menor finura das partículas de CV (por comparação com as partículas de cimento), as mesmas preenchem os vazios entre as partículas de cimento e desse modo não só melhoram a distribuição granulométrica do material pulverulento como melhoram a fluidez da pasta de cimento [16, 17].

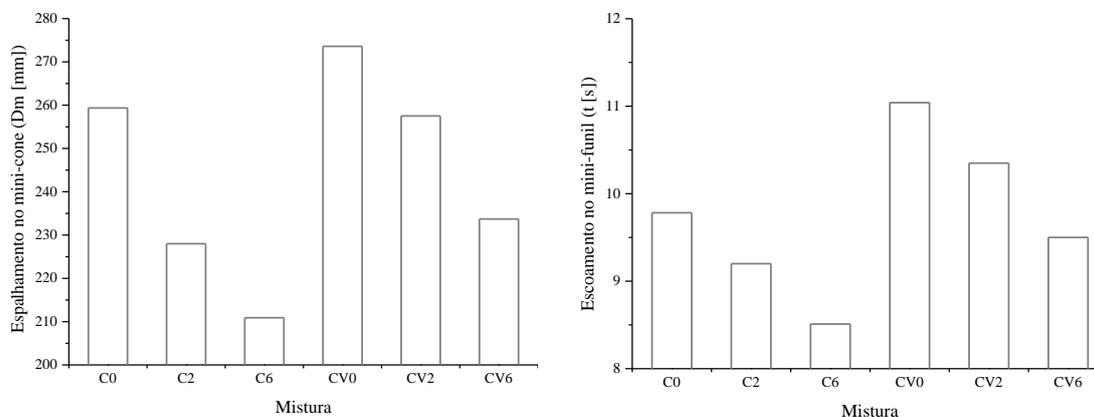


Figura 1 - Espalhamento no mini-cone (esq), Escoamento no mini-funil (dt^a)

Os valores médios apresentados na tabela 2 e na figura 1, relativamente ao tempo de escoamento no mini funil V, permitem avaliar a capacidade das AAC de passar através de pequenas aberturas. Da observação dos resultados, é possível constatar que os valores médios obtidos por todas as misturas estudadas se enquadram como auto-compactáveis, variando, no geral, entre 8,5 e 11 segundos.

Da observação visual do ensaio, é possível verificar o não bloqueio na passagem estreita, a presença de agregado (areia) no topo do molde (antes da abertura da comporta) bem como a não ocorrência de exsudação. Pode ainda observar-se que, após a realização do ensaio, a argamassa continua a apresentar-se como uma massa uniformemente distribuída.

Relativamente ao escoamento no mini-funil verificasse um comportamento análogo ao observado para o espalhamento com uma perda de fluidez entre 5% e 13% para as misturas com 100%C e entre 6% e 14% para as misturas com 70%C+30%CV. A perda de fluidez devida ao aumento da percentagem do OG nas misturas é equivalente ao observado no ensaio de espalhamento.

Pode concluir-se, da análise conjunta dos dois ensaios (mini-cone e mini-funil), que todas as misturas analisadas apresentam coesão, com um aspecto viscoso sem, no entanto, perderem a capacidade de se deformar.

3.2. Resultados no estado endurecido – comportamento mecânico

Os resultados da resistência à compressão e à flexão são apresentados na Tabela 3, Figuras 2 e 3, Tabela 4 e Figuras 4 e 5 respectivamente. Os resultados mostram um aumento considerável nas resistências à compressão e à flexão. A adição de OG aumenta, aos 28 dias, a resistência à compressão de 20 a 24% e resistência à flexão de 3 a 10% nas misturas com 100%C. Nas misturas com 70%C+30%CV o referido aumento é de 16 a 21% na resistência à compressão e de 13 a 20% na resistência à flexão.

O referido aumento da resistência das argamassas com a adição do OG pode ser atribuído à forte interligação entre o OG e a matriz cimentícia [18]. De acordo com Li e Cols [19] O OG contém grupos de ácido carboxílico que conseguem reagir com o CSH e com $\text{Ca}(\text{OH})_2$ o que contribui para a criação de uma forte ligação covalente entre o OG e a matriz cimentícia e, desse modo, melhorar as propriedades mecânicas da mistura. Yang et al [20] apresentam conclusões semelhantes referindo que a adição de OG distribui a tensão imposta pelas cargas externas e reduz a pressão sobre o CSH devido essencialmente à melhor interligação do OG com a matriz cimentícia.

Por outro lado, Lin et al [21], referem que o aumento da resistência devido à adição de OG depende essencialmente do seu contributo para o processo de hidratação do cimento

actuando/funcionando como um catalisador. A elevada superfície específica e capacidade de adsorção de água do OG geram “reservatórios de água” e “canais de transporte” para a fase fluida da mistura (incluindo para as partículas de cimento) promovendo igualmente pontos de nucleação e fomentando o crescimento de cristais de cálcio. No mesmo sentido, Li et al [22], com recurso ao estudo da evolução do calor de hidratação de misturas com OG nas primeiras idades referem que o efeito de nucleação mencionado por Lin et al [21] encurtou a fase de dormência da hidratação do cimento de tal modo que a taxa de hidratação e o calor cumulativo de hidratação da pasta de cimento com OG foram significativamente maiores do que os da pasta de cimento sem OG. Os mesmos autores [22] concluem que o efeito do OG na hidratação do C₃A é significativamente maior do que no C₃S, o que conduz a uma microestrutura mais densa com mais produtos de hidratação envolvendo os poros de OG e consequente melhoria de resistência mecânica das misturas.

Tabela 3 - Resultados no estado endurecido – compressão

Mistura	Resistência à compressão [MPa]								
	f _{cm,7d}	S	ΔRef ^a [%]	f _{cm,28d}	S	ΔRef ^a [%]	f _{cm,91d}	S	ΔRef ^a [%]
C0	14,93	1,61	---	21,88	2,65	---	22,57	2,52	---
C2	18,95	2,82	26,94	26,35	4,26	20,44	28,12	3,45	24,58
C6	20,21	0,21	35,43	27,10	0,38	23,86	28,32	0,36	25,46
CV0	10,77	0,06	---	12,32	0,08	---	13,70	0,08	---
CV2	12,33	0,73	14,49	14,33	1,07	16,33	15,59	0,92	13,80
CV6	12,92	0,37	20,00	14,87	0,48	20,66	16,00	0,44	16,78

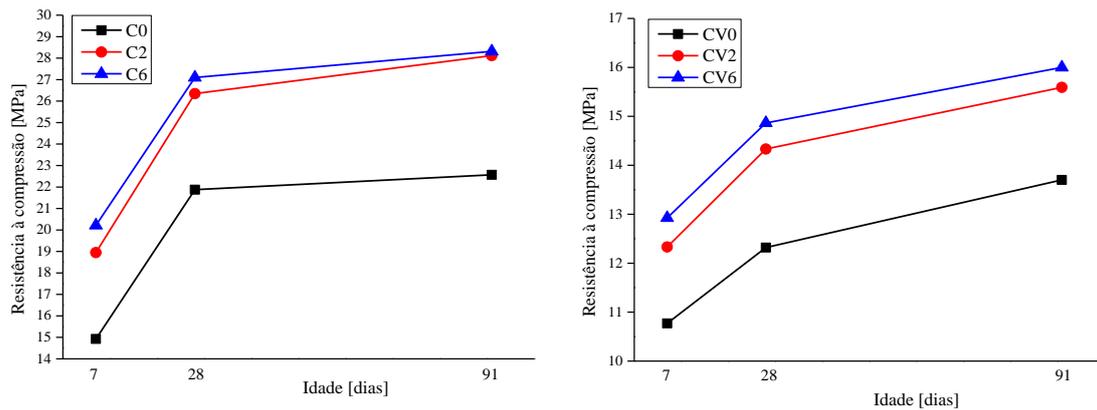


Figura 2 - Variação da resistência à compressão com a idade, misturas 100% C (esq) e misturas 70% C + 30% CV (dt^a)

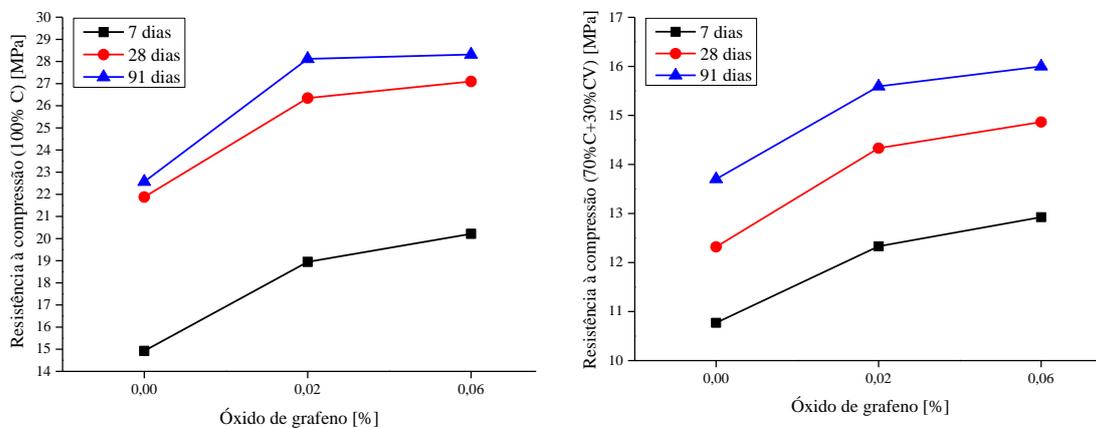


Figura 3 - Variação da resistência à compressão com a percentagem de óxido de grafeno, misturas 100% C (esq) e misturas 70% C + 30% CV (dt^a)

No caso da resistência à compressão verificam-se valores mais significativo nas misturas com 100% C

do que nas misturas com 70%C+30%CV, associado por um lado às diferenças na razão A/C entre as duas famílias de AAC e por outro ao efeito das CV no processo de endurecimento e evolução da resistência. Tal como verificado por Wang et al [17], apesar da diminuição geral da resistência com a adição das CV (por comparação com as misturas 100%C) é possível verificar que a resistência das misturas com CV e OG (CV2 e CV6) é sempre superior à mistura de referência (CV0). Os autores [17] salientam ainda que apesar das desvantagens associadas ao atraso inicial no desenvolvimento da resistência devido às CV, estas podem compensar a perda de fluidez devida ao OG (ver Figura 1 e 2).

Analisando a Figura 3 verificasse que as diferenças na resistência à compressão entre as misturas com 0,02% e 0,06% são reduzidas, apresentando variações inferiores a 3% aos 28 dias e a 1% aos 91 dias nas misturas 100%C e inferiores a 4% aos 28 dias e a 3% aos 91 dias nas misturas 70%C+30%CV. Diversos autores [23-29] referem que a quantidade de OG que otimiza a resistência à compressão deverá estar entre $\approx 0,03\%$ e $\approx 0,07\%$, podendo variar em função da composição do OG. É possível observar, em alguns dos referidos trabalhos, que a partir de $\approx 0,09\%$ (dependendo do tipo de OG) é possível, inclusive, obter uma redução geral do comportamento mecânico.

Tabela 4 - Resultados no estado endurecido – flexão

Mistura	Resistência à flexão [MPa]								
	$f_{ctm,7d}$	S	Δ_{Ref} [%]	$f_{ctm,28d}$	S	Δ_{Ref} [%]	$f_{ctm,91d}$	S	Δ_{Ref} [%]
C0	3,44	0,02	---	4,60	0,02	---	4,90	0,02	---
C2	3,72	0,17	8,08	4,75	0,20	3,28	5,15	0,17	5,09
C6	3,96	0,17	15,09	5,08	0,24	10,37	5,38	0,23	9,90
CV0	2,68	0,14	---	3,01	0,18	---	3,37	0,18	---
CV2	2,98	0,11	11,17	3,41	0,12	13,33	3,81	0,11	13,11
CV6	3,16	0,34	18,06	3,61	0,35	19,91	3,94	0,32	17,03

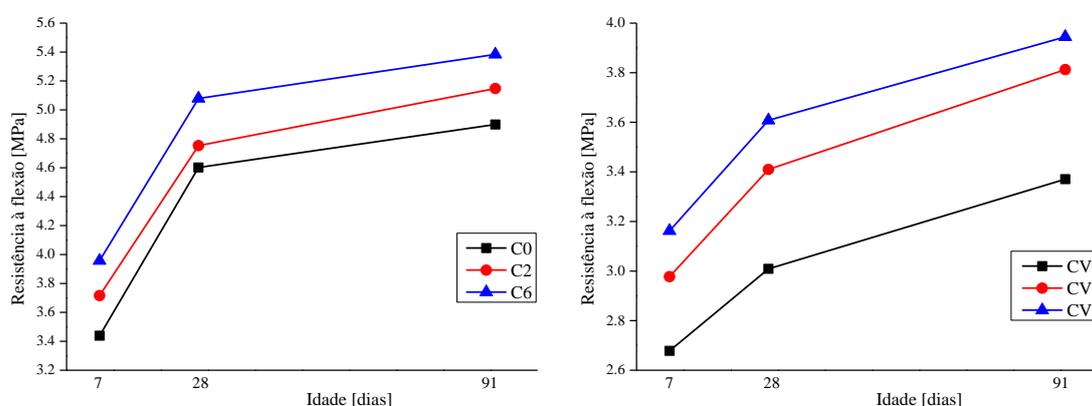


Figura 4 - Variação da resistência à flexão com a idade, misturas 100% C (esq) e misturas 70% C + 30% CV (dt^a)

3.3. Resultados no estado endurecido – absorção de água por capilaridade

Na Tabela 5 e nas Figuras 6 e 7 são apresentados os valores de absorção de água por capilaridade e o respectivo coeficiente de absorção para os 28 e os 91 dias de idade. Relativamente a este mecanismo de transporte verifica-se um comportamento significativamente díspar do observado na resistência mecânica. Nas misturas com C é possível observar que a C2 (com 0,02% de OG) apresenta um desempenho mais favorável que as restantes, enquanto a C6 (com 0,06% de OG) obteve valores de absorção superiores aos da mistura de referência. Esta tendência manteve-se nas duas idades estudadas (28 e 91 dias).

Nas misturas com 70%C+30%CV verificasse um comportamento diferente: a adição de OG não representou qualquer ganho na absorção de água por capilaridade nas duas idades estudadas (28 e 91 dias). Nestas misturas, com o acréscimo de OG, verificasse um aumento tanto da absorção como do respectivo coeficiente. No entanto, como seria expectável, o desempenho

global das misturas melhora com a idade (dos 28 para os 91 dias).

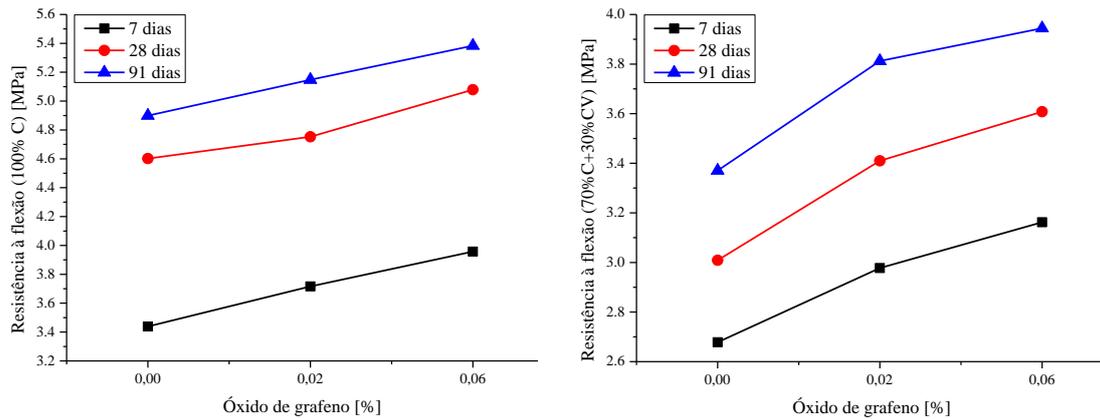


Figura 5 - Variação da resistência à flexão com a percentagem de óxido de grafeno, misturas 100% C (esq) e misturas 70% C + 30% CV (dt^a)

Tabela 5 - Resultados no estado endurecido - capilaridade

Identificação	Idade [dias]	Abs t 1/4 horas		Abs t 1/2 horas		Abs t 3/4 horas		Abs t 1 horas		Abs t 2 horas		Abs t 4 horas		Abs t 6 horas		Abs t 24 horas		Abs t 72 horas		Coef de absorção	
		Abs _m	S	Coef _{abs}	R ²																
Mistura		[Kg/m ²]		[Kg/m ²]		[Kg/m ²]		[Kg/m ²]		[Kg/m ²]		[Kg/m ²]		[Kg/m ²]		[Kg/m ²]		[Kg/m ²]		[mm/min ^{0,5}]	
C0	28	0,619	0,169	0,947	0,272	1,241	0,378	1,375	0,412	1,947	0,572	2,741	0,803	3,331	0,969	6,200	1,438	9,897	2,103	0,177	0,999
	91	0,340	0,022	0,526	0,047	0,713	0,021	0,814	0,129	1,177	0,346	1,802	0,232	2,193	0,374	4,693	0,326	8,793	0,374	0,119	0,996
C2	28	0,434	0,009	0,503	0,072	0,644	0,112	0,712	0,106	0,975	0,181	1,384	0,303	1,703	0,397	3,584	0,909	5,319	0,744	0,088	0,997
	91	0,238	0,012	0,280	0,013	0,369	0,063	0,420	0,033	0,591	0,110	0,912	0,088	1,119	0,235	2,725	0,207	4,714	0,318	0,059	0,995
C6	28	0,634	0,047	0,991	0,053	1,288	0,069	1,572	0,084	2,419	0,119	3,728	0,141	4,731	0,181	9,772	0,184	15,453	0,091	0,258	0,989
	91	0,348	0,060	0,551	0,093	0,740	0,039	0,930	0,026	1,463	0,072	2,453	0,041	3,113	0,107	7,881	0,045	12,598	0,148	0,172	0,976
CV0	28	0,403	0,028	0,516	0,009	0,603	0,009	0,691	0,022	0,966	0,078	1,394	0,131	1,734	0,172	4,053	0,347	8,553	1,134	0,090	0,998
	91	0,219	0,036	0,283	0,016	0,339	0,005	0,399	0,007	0,568	0,046	0,878	0,036	1,071	0,096	2,895	0,074	7,592	2,014	0,057	0,995
CV2	28	0,434	0,047	0,647	0,103	0,812	0,131	0,928	0,153	1,469	0,213	2,322	0,297	3,050	0,356	7,541	0,647	15,394	1,431	0,163	0,983
	91	0,237	0,060	0,354	0,018	0,458	0,072	0,537	0,047	0,863	0,125	1,374	0,077	2,012	0,211	5,370	0,138	13,688	2,545	0,105	0,961
CV6	28	0,487	0,019	0,750	0,013	0,975	0,006	1,156	0,019	1,822	0,116	2,859	0,284	3,722	0,434	9,059	1,078	17,553	1,353	0,201	0,984
	91	0,266	0,024	0,412	0,022	0,547	0,003	0,668	0,006	1,132	0,072	1,689	0,074	2,299	0,241	6,439	0,230	15,710	2,422	0,124	0,977

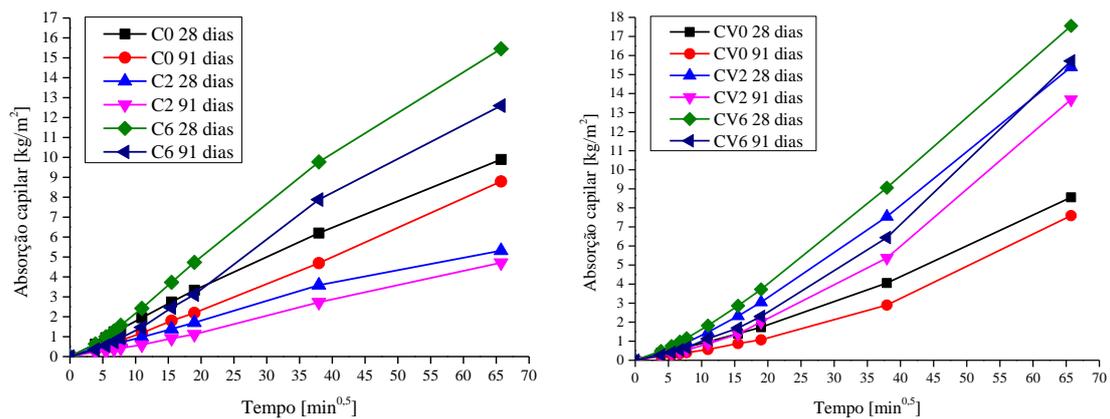


Figura 6 - Curvas de absorção capilar aos 28 e 91 dias para as misturas 100% C (esq) e 70% C + 30% CV (dt^a)

Os referidos resultados estão em linha com o observado por outros autores. Mohammed et al [7] referem que a adição de OG aumenta a quantidade de pequenos poros presentes na matriz cimentícia, aumentando significativamente a quantidade de poros com dimensão inferior a 15 nm. Outros autores [30, 31, 32] referem que a adição de OG pode conduzir a um aumento na parcela de poros capilares na faixa de 100 a 1000 nm. As variações nos valores apresentados estão

claramente associadas às diferenças no tipo de OG bem como às diferentes dosagens estudadas pelos referidos autores. Bykkam [30] e Lv S et al [31] afirmam que o referido comportamento pode ser atribuído ao facto de algumas camadas de OG possuírem folhas tridimensionais interligadas formando uma estrutura porosa semelhante a um material “esponjoso”.

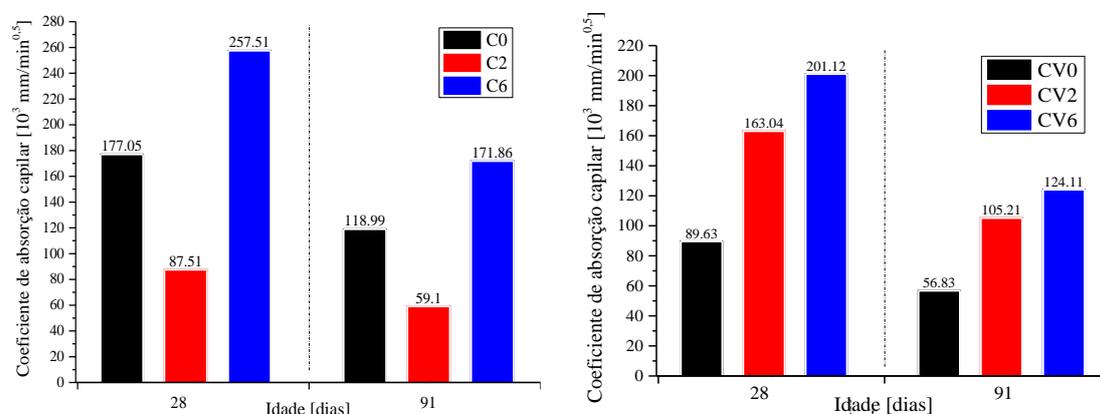


Figura 7 - Coeficientes de absorção capilar aos 28 e 91 dias para as misturas 100% C (esq) e 70% C + 30% CV (dt^a)

4. Conclusões

Todas as misturas estudadas, só com C, com CV em substituição parcial do cimento e com a adição de OG, cumprem os requisitos no que diz respeito à viscosidade, capacidade de escoamento e capacidade de passagem em espaços confinados e, portanto, podem ser classificadas como auto-compactáveis. Ou seja, a incorporação do OG permitiu a produção de ACC com um desempenho adequado no estado fresco, apesar de, no entanto, ter ocorrido alguma perda de trabalhabilidade compensada com o ajuste nas dosagens de superplastificante. A referida perda de desempenho ocorreu essencialmente devido à elevada superfície específica das partículas de OG que tendencialmente dificultam a dispersão das partículas de cimento, limitando desse modo o escoamento.

A adição de OG melhorou significativamente o desempenho mecânico de todas as misturas estudadas. Considerando os 28 dias de idade de ensaio é de salientar um aumento de 35% na resistência à compressão da mistura com C e 0,06% de OG por comparação com a mistura de referência. O referido aumento generalizado do comportamento mecânico de todas as misturas estudadas está fortemente relacionado com para a melhoria da interligação entre o OG e a matriz cimentícia bem como com o seu contributo para o processo de hidratação do cimento funcionando como um catalisador na reacção.

No geral verifica-se que a melhoria do desempenho mecânico das misturas com a adição de OG está fortemente relacionado com a melhoria da microestrutura devido ao efeito regulador de OG, acelerando o processo de hidratação, regulando os cristais de hidratação, otimizando a estrutura dos poros e melhorando a interface de ligação da matriz cimentícia.

No caso da absorção de água por capilaridade observasse um comportamento distinto do comportamento mecânico. Nas misturas com 100% de C obteve-se uma melhoria com 0,02% de OG que se anula com 0,06%. Nas misturas binárias observa-se uma perda global de desempenho com a adição do OG. As propriedades do OG apresentam uma influência significativa no desempenho das misturas, no entanto, existem diversos estudos que apontam para um aumento da parcela de poros capilares com a adição de OG.

Com o presente trabalho foi possível verificar, no geral, uma melhoria no desempenho das argamassas produzidas com OG, demonstrando a viabilidade desta adição, por exemplo, na contribuição para a redução da quantidade de cimento nas misturas não só de argamassas como até de betões. Será, no entanto, essencial realizar mais estudos que permitam verificar a influencia da adição do OG na durabilidade das misturas.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio do Instituto Politécnico de Lisboa (IPL) através do financiamento do projecto de investigação científica “LOWCO2MPOSITES - Durable environmental-friendly cement composites using very low binder contents (IPL/2022/ LOWCO2MP_ISEL)”. Agradece-se de igual modo o apoio do centro de investigação CERIS - IST.

Referências

- [1] S. Chuah, Z. Pan, J. Sanjayan, C. Wang, W. Duan, Nano reinforced cement and concrete composites and new perspective from graphene oxide (Review), *Constr. Build. Mater.*, 73 (2014) 113-124.
- [2] P. Hou, S. Kawashima, D. Kong, D. Corr, J. Qian, S. Shah, Modification effects of colloidal nanoSiO₂ on cement hydration and its gel property, *Compos. Part B: Eng.*, 45(1) (2013) 440–8.
- [3] S. Lv, Y. Ma, C. Qiu, J. Liu, T. Sun, Q. Zhou, Effect of graphene oxide nanosheets of microstructure and mechanical properties of cement composites, *Constr. Build. Mater.*, 49 (2013) 121–127.
- [4] Z. Pan, W. Duan, D. Li, F. Collins, Graphene oxide reinforced cement and concrete, Monash University, [WO2013096990 A1], 2013.
- [5] T. Kuilla, S. Bhadra, D. Yao, N. Kim, S. Bose, J. Lee, Recent advances in graphene-based polymer composites, *Prog. Polym. Sci.*, 35(11) (2010) 1350–1375.
- [6] X. He, X. Shi, Chloride permeability and microstructure of Portland cement mortars incorporating nanomaterials, *Transp. Res. Rec.*, 2070(1) (2008) 13–21.
- [7] A. Mohammed, J.G. Sanjayan, W.H. Duan, A. Nazari, Effect of graphene oxide nanosheets of microstructure and mechanical properties of cement composites, *Constr. Build. Mater.*, 84 (2015) 341-347.
- [8] Q. Wang, J. Wang, C. Lu, B. Liu, K. Zhang, C. Li, Influence of graphene oxide additions on the microstructure and mechanical strength of cement, *Xinxing Tan Cailiao/New Carbon Materials*, 30(4) (2015) 349–356.
- [9] S. Lv, L. Deng, W. Yang, Q. Zhou, Y. Cui, Fabrication of polycarboxylate/graphene oxide nanosheet composites by copolymerization for reinforcing and toughening cement composites, *Cem. Concr. Compos.*, 66 (2019) 1–9.
- [10] H. Sun, L. Ling, Z. Ren, S. Memon, F. Xing, Effect of graphene oxide/graphene hybrid on mechanical properties of cement mortar and mechanism investigation, *Nanomaterials*, 10(1) (2020).
- [11] M. Nepomuceno, L. Oliveira, Parameters for self-compacting concrete mortar phase, *ACI Mater. J.*, 253 (2008) 323–340.
- [12] M. Nepomuceno, L. Oliveira, S. Lopes, Methodology for mix design of the mortar phase of self-compacting concrete using different mineral additions in binary blends of powders, *Constr. Build. Mater.*, 26 (2012) 317–326.
- [13] P. Silva, J. de Brito, J. Costa, Viability of two new mix design methodologies for SCC, *ACI Mater. J.*, 108(6) (2011) 579–588.
- [14] H. Okamura, K. Ozawa, M. Ouchi, Self-Compacting Concrete, *Struct. Concr. J.*, Thomas Telford Ltd, 1 (1) (2000) 3-17.
- [15] S.H. Lv, Y.J. Ma, C.C. Qiu, T. Sun, J. Liu, Q. Zhou, Effect of graphene oxide nanosheets of microstructure and mechanical properties of cement composites, *Constr. Build. Mater.*, 49 (2013) 121–127.
- [16] Y.R. Zhang, X.M. Kong, Z.C. Lu, et al., Influence of triethanolamine on the hydration product of portlandite in cement paste and the mechanism, *Cem. Concr. Res.* 87 (2016) 64–76.
- [17] Q. Wang, X. Cui, J. Wang, S. Li, C. Lv, Y. Dong, Effect of fly ash on rheological properties of graphene oxide cement paste, *Constr. Build. Mater.* 138 (2017) 35–44.
- [18] Z. Pan, L. He, L. Qiu, A. H. Korayem, G. Li, J. W. Zhu, F. Collins, D. Li, W. H. Duan, M. C. Wang, Mechanical properties and microstructure of a graphene oxide–cement composite,

- Cem. Concr. Compos. 58 (2015) 140–147.
- [19] G. Li, P. Wang, X. Zhao, Mechanical behavior and microstructure of cement composites incorporating surface-treated multi-walled carbon nanotubes, *Carbon*, 43(6) (2005) 1239–1245.
- [20] H. Yang, M. Monasterio, H. Cui, N. Han, Experimental study of the effects of graphene oxide on microstructure and properties of cement paste composite, *Compos.: Part A*, 102 (2017) 263–272.
- [21] C. Lin, W. Wei, Y.H. Hu, Catalytic behavior of graphene oxide for cement hydration process, *J. Phys. Chem. Solid.*, 89 (2016) 128–133.
- [22] W. Li, X. Li, S.J. Chen, Y.M. Liu, W.H. Duan, S.P. Shah, Effects of graphene oxide on early-age hydration and electrical resistivity of Portland cement paste, *Construct. Build. Mater.*, 136 (2017) 506–514.
- [23] R. Kaur, N.C. Kothiyal, H. Arora, Studies on combined effect of superplasticizer modified graphene oxide and carbon nanotubes on the physico-mechanical strength and electrical resistivity of fly ash blended cement mortar, *J. Build. Eng.* 30 (2020) 101304.
- [24] Z. Lu, D. Hou, L. Meng, G. Sun, C. Lu, Z. Li, Mechanism of cement paste reinforced by graphene oxide/carbon nanotubes composites with enhanced mechanical properties, *RSC Adv.*, 5(122) (2015) 100598–100605.
- [25] C. Zhou, F. Li, J. Hu, M. Ren, J. Wei, Q. Yu, Enhanced mechanical properties of cement paste by hybrid graphene oxide/carbon nanotubes, *Construct. Build. Mater.*, 134 (2017) 336–345.
- [26] S. Najafshad, H.D. Manesh, S.M. Zebarjad, N. Hataf, Y. Mazaheri, Production and investigation of mechanical properties and electrical resistivity of cement-matrix nanocomposites with graphene oxide and carbon nanotube reinforcements, *Arch. Civ. Mech. Eng.*, 20(2) (2020) 57.
- [27] H. Sun, L. Ling, Z. Ren, S.A. Memon, F. Xing, Effect of graphene Oxide/Graphene hybrid on mechanical properties of cement mortar and mechanism investigation, *Nanomaterials*, 10(1) (2020) 113.
- [28] H. Liu, Y. Yu, H. Liu, J. Jin, S. Liu, Hybrid effects of nano-silica and graphene oxide on mechanical properties and hydration products of oil well cement, *Construct. Build. Mater.*, 191 (2018) 311–319.
- [29] C. Lin, W. Wei, Y.H. Hu, Catalytic behavior of graphene oxide for cement hydration process, *J. Phys. Chem. Solid.*, 89 (2016) 128–133.
- [30] S. Bykkam, V. Rao, S.C. Ch, T. Thunugunta, Synthesis and characterization of graphene oxide and its antimicrobial activity against *Klebsiella* and *Staphylococcus*, *Int. J. Adv. Biotechnol. Res.*, 4 (2013) 142–146.
- [31] S. Lv, Y. Ma, C. Qiu, Q. Zhou, Regulation of go on cement hydration crystals and its toughening effect, *Mag. Concr. Res.*, 65 (2013) 1246–1254.
- [32] S. Panzavolta, B. Bracci, C. Gualandi, M. Focarete, E. Treossi, K. Kouroupis-Agalou, et al., Structural reinforcement and failure analysis in composite nanofibers of graphene oxide and gelatin, *Carbon*, 78 (2014) 566–77.

ORCID

Pedro Miguel Soares Raposeiro da Silva

0000-0001-8770-8439 (<http://orcid.org/0000-0001-8770-8439>)

Luis Manuel Faria da Rocha Evangelista

0000-0001-8406-6864 (<https://orcid.org/0000-0001-8406-6864>)