

Placas sustentáveis à base de argamassas de cimento com incorporação direta de PCM

CUNHA Sandra^{1, a}, AGUIAR Ingrid^{1, b} e AGUIAR José^{1, c}

¹Centro Território, Ambiente e Construção, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho

Campus de Azurém, 4800-058, Guimarães, Portugal

^asandracunha@civil.uminho.pt, ^bingried.aguiar@hotmail.com, ^caguiar@civil.uminho.pt

Palavras-chave: Argamassas, Placas, Materiais de Mudança de Fase, Sustentabilidade.

Resumo. Atualmente, é necessário dar um novo rumo ao setor da construção civil, tornando-se imprescindível alterar a forma como os edifícios são construídos e reabilitados, com o objetivo de obter uma construção mais sustentável. Cada vez mais é importante minimizar os elevados consumos energéticos dos edifícios durante a sua vida útil, tirando partido de fontes de energia renováveis, como a energia solar. Os materiais de mudança de fase (PCM) podem reduzir o consumo energético dos edifícios devido à sua capacidade de armazenamento térmico. A utilização de PCM em materiais de construção possui benefícios sociais, ambientais e económicos relacionados com o aumento do conforto térmico, diminuição do consumo de energia de fontes não renováveis e diminuição das necessidades e custos de climatização. O desenvolvimento de placas sustentáveis à base de argamassas de cimento com incorporação direta de PCM constitui uma nova opção para a melhoria da eficiência energética dos edifícios em operações de reabilitação e construções novas. Neste trabalho, inicialmente foram estudadas as principais propriedades das argamassas com incorporação direta de PCM, com base no seu comportamento físico, mecânico e térmico. Posteriormente, foram desenvolvidas placas à base destas argamassas e testadas quanto às suas principais propriedades físicas e mecânicas. A realização deste trabalho permitiu concluir que a incorporação de PCM em argamassas e placas altera as suas propriedades do ponto de vista físico, mecânico e térmico. Em relação à caracterização das argamassas, foi possível verificar que a inclusão de PCM originou uma diminuição da resistência à flexão e compressão, diminuição da temperatura máxima e aumento da temperatura mínima para a estação de verão e primavera. No que confere à caracterização das placas verificou-se que a incorporação de PCM originou um aumento da sua macroporosidade e diminuição da resistência à flexão.

Introdução

Atualmente, a Europa enfrenta graves problemas relacionados com o consumo de energia, agravados pelos recentes conflitos internacionais em países produtores e exportadores de gás natural e petróleo. Assim, cada vez mais a União Europeia necessita de encontrar formas de se tornar mais independente em termos energéticos. Desta forma, investir em energia renovável pode ser uma forma de minimizar essa dependência energética. Por outro lado, apostar em materiais de construção funcionais, nomeadamente materiais de construção com capacidade de armazenamento térmico, pode também contribuir para aumentar o conforto energético nos edifícios residenciais e de serviços.

Na Europa, o consumo final de energia é essencialmente baseado em petróleo bruto e energia elétrica. Em Portugal cerca de 42% do consumo de energia é baseado em petróleo bruto e produtos petrolíferos, 26,7% em energia elétrica, 19,5% em energias renováveis, 11,7% em gás e 0,1% em combustíveis sólidos [1]. Nos últimos anos, entre 2000 e 2020, verificou-se um aumento da utilização de energias renováveis em todos os países da União Europeia. A Alemanha, França e Itália são os países com maior taxa de utilização de energia proveniente de fontes renováveis. Em

Portugal, no mesmo período verificou-se um aumento da utilização de fontes de energia renováveis de cerca de 24%, fruto de várias medidas de incentivo criadas pelas autoridades governamentais [1].

Grande parte da energia renovável produzida na Europa encontra-se associada à biomassa e resíduos, cerca de 57%, sendo que a utilização de energia solar representa apenas cerca de 7%. Em Portugal, a produção de energia renovável com base em biomassa e resíduos é ligeiramente inferior, cerca de 51%, enquanto a energia solar é ligeiramente superior, cerca de 11%. A disponibilidade de energia solar é imensa, sendo que a cada ano a energia fornecida pelo sol que atinge toda a superfície terrestre é cerca de 10.000 vezes superior ao consumo atual de energia por ano em todo o mundo [2]. Assim, torna-se necessário não só aumentar o recurso a fontes de energia renováveis, mas também aumentar especificamente o recurso à energia solar.

Os materiais de mudança de fase (PCM) têm vindo a ser estudados para aplicações em edifícios devido à sua capacidade de armazenamento térmico, com base na energia solar. Várias soluções têm sido desenvolvidas para diferentes elementos construtivos, tais como paredes [3-7], pavimentos [8-11] e tetos [12-14].

A incorporação de PCM em materiais de construção pode ser realizada através de diferentes técnicas [15] tais como o encapsulamento (microencapsulamento [3, 6, 16-18] e macroencapsulamento [5, 7, 19-20]), imersão [21-22], estabilização [23] e incorporação direta [24]. O encapsulamento tem sido a técnica de incorporação de PCM mais utilizada nos edifícios [15], no entanto acarreta um custo de produção significativamente superior quando comparado à incorporação direta, que permite a utilização do PCM sem necessidade de tratamento prévio [24].

O principal objetivo deste trabalho consistiu em desenvolver e caracterizar argamassas e placas de revestimento interior com incorporação direta de PCM. A composição das placas foi baseada na composição das argamassas previamente desenvolvida. Foram desenvolvidas quatro composições distintas com diferentes teores de PCM (0%, 5%, 10% e 20%). O comportamento das argamassas foi avaliado, no estado fresco e endurecido, com base na trabalhabilidade, desempenho mecânico e desempenho térmico. O comportamento das placas foi avaliado no estado endurecido, com base no volume de poros abertos, massa volúmica real e aparente, porosidade total, absorção de água por imersão, absorção de água por capilaridade e resistência à flexão.

Campanha experimental

Materiais. O cimento utilizado foi o CEM II/B-L 32,5 N com uma massa volúmica de 3030 kg/m³. As cinzas volantes utilizadas foram produzidas numa central termoelétrica portuguesa a carvão e apresentaram uma massa volúmica de 2420 kg/m³.

O agregado utilizado foi composto por dois tipos diferentes de areia (A e B). A areia A possui uma dimensão mínima de 0,125 mm e dimensão máxima de 0,5 mm, apresentando um tamanho médio de partícula de 439,9 µm e massa volúmica de 2600 kg/m³. A areia B é constituída por partículas com dimensão mínima de 0,125 mm e dimensão máxima de 8 mm, apresentando um tamanho médio de partícula de 762 µm e massa volúmica de 2569 kg/m³.

O PCM utilizado é não encapsulado, de natureza orgânica, composto por uma parafina com transição de temperatura compreendida entre 20°C e 23°C, entalpia de 200 kJ/kg, massa volúmica no estado sólido de 760 kg/m³ e massa volúmica no estado líquido de 700 kg/m³.

Procedimentos de ensaio. No que diz respeito às argamassas aditivadas com PCM não encapsulado, estas foram avaliadas tendo em consideração o seu desempenho físico, mecânico e térmico. O seu comportamento físico foi baseado na trabalhabilidade. O seu comportamento mecânico foi baseado na resistência à flexão e resistência à compressão. Por último, o seu desempenho térmico foi avaliado com base na influência do PCM na temperatura máxima e mínima, simulada em câmara climática. A trabalhabilidade das argamassas foi determinada com base no método da mesa de espalhamento de acordo com a especificação europeia EN 1015-3 [25]. O valor resultante do ensaio apenas foi considerado quando compreendido entre 170 e 180 mm. A resistência à flexão e compressão foram determinadas com base na especificação europeia EN 1015-11 [26], sendo que os ensaios foram realizados com controle de carga a uma velocidade de 50 N/s e 150 N/s, respetivamente. Por último, o comportamento térmico foi avaliado com recurso a

uma câmara climática. Para cada composição em estudo foi construída uma célula de teste em pequena escala com dimensões de 200×200×200 mm³ com recurso a um material isolante (XPS) e equipada com um termopar. As argamassas foram aplicadas no interior da célula de teste revestindo todas as superfícies. Cada célula de teste foi colocada no interior da câmara climática, sendo posteriormente simulada a estação de verão e primavera, com base em dados meteorológicos recolhidos numa estação meteorológica instalada no campus da Universidade do Minho em Guimarães. O estudo da estação de verão foi baseado numa lei de temperatura compreendida entre 11°C e 44°C. Para a estação de primavera, a lei de temperatura utilizada foi entre 12°C e 29°C.

Relativamente à caracterização das placas aditivadas com PCM, estas foram avaliadas tendo em conta o seu comportamento físico e mecânico. Tendo em consideração a ausência de normas harmonizadas específicas para este tipo de material, decidiu-se adaptar as normas para placas de pedra natural. O comportamento físico foi baseado na massa volúmica real e aparente, porosidade total e aberta e absorção de água por capilaridade e imersão. O comportamento mecânico foi baseado na resistência à flexão. A determinação do volume de poros abertos, massa volúmica real e aparente e porosidade total foi realizada de acordo com a especificação NP EN 1936 [27]. A determinação da massa volúmica real e da porosidade total foi realizada de acordo com o método Le Chatelier, descrito na especificação NP EN 1936 [27]. A absorção de água por imersão foi realizada de acordo com a especificação NP EN 13755 [28] e a absorção de água por capilaridade foi determinada de acordo com a NP EN 1925 [29]. Por último, o comportamento em flexão das placas aditivadas com PCM foi determinado com base na especificação NP EN 12372 [30] com controle de carga e a uma velocidade de 50 N/s.

Provetes, protótipo das placas e condições de cura. A determinação da resistência à flexão e à compressão das argamassas foi realizada utilizando 3 provetes prismáticos com dimensões de 40×40×160 mm³.

A determinação da geometria e dimensão do protótipo das placas aditivadas com PCM, foi realizada com base numa pesquisa de mercado, tendo sido possível verificar uma grande disponibilidade de placas de pedra natural e compósitos com diferentes dimensões adequadas às mais variadas necessidades de projeto. Desta forma, optou-se por seguir as indicações geométricas previstas na especificação NP EN 12372 [30], considerando uma geometria que permita o seu fácil manuseio e produção industrial, sendo selecionada uma geometria prismática com dimensões de 100×100×20 mm³.

A determinação do volume de poros abertos, massa volúmica real e aparente, porosidade total e aberta e resistência à flexão das placas, foi obtida com base em 5 provetes prismáticos com dimensões reais de 100×100×20 mm³. A absorção de água por imersão à pressão atmosférica e a absorção de água por capilaridade foram determinadas utilizando 6 provetes cúbicos com dimensões de 50×50×50 mm³.

Após a sua preparação, todos os provetes e placas protótipo foram armazenadas durante 7 dias em sacos de polietileno, sendo posteriormente colocadas em ambiente de laboratório com temperatura controlada de 20°C e humidade relativa de 65%, durante 21 dias.

Composições. O desenvolvimento destas composições teve em conta trabalhos anteriores [31-33]. Foram desenvolvidas quatro composições distintas de argamassas à base de cimento com incorporação de diferentes teores de PCM não encapsulado (Tabela 1). Tendo sido produzida uma argamassa de referência, sem incorporação de PCM (C0PCM) e uma argamassa com um teor de incorporação de 5% PCM (C5PCM), 10% PCM (C10PCM) e 20% PCM (C20PCM) em relação à massa de agregado. A quantidade de ligante utilizada foi de 500 kg/m³, sendo constituído por 40% cimento e 60% de cinzas volantes. O agregado foi constituído por 50% de Areia A e 50% de Areia B.

Tabela 1: Composição das argamassas (kg/m³)

Composição	Cimento	Cinza Volante	Areia A	Areia B	PCM	Água
C0PCM	200	300	684.9	684.9	0	280
C5PCM	200	300	583.6	583.6	58.4	275
C10PCM	200	300	519.1	519.1	103.8	260
C20PCM	200	300	423.7	423.7	169.5	240

Caracterização das argamassas

Trabalhabilidade. De acordo com a Figura 1 observou-se uma diminuição da relação água/ligante com a incorporação de um maior teor de PCM nas argamassas, sendo que a incorporação de 5%, 10% e 20% de PCM originou uma diminuição na quantidade de água das argamassas em cerca de 2%, 7% e 14%, respectivamente. O comportamento identificado pode ser justificado pelo fato do PCM ser incorporado no estado líquido nas argamassas. Assim, o PCM funciona como um agente para a formação de uma argamassa homogênea, mesmo sem contribuir para o processo de hidratação do ligante.

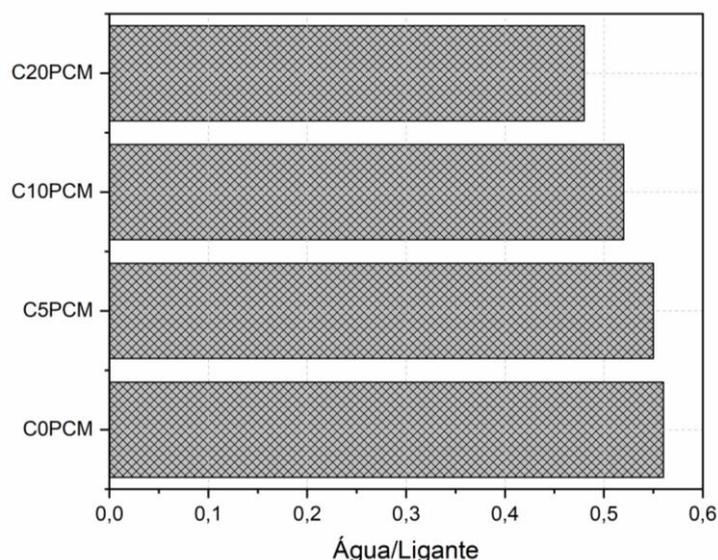


Figura 2: Relação água/ligante das argamassas.

Resistência à flexão e compressão A Figura 2 apresenta o comportamento em flexão e compressão das argamassas com incorporação direta de PCM, tendo sido possível observar que a incorporação de PCM provocou uma diminuição no desempenho mecânico das argamassas. Relativamente à resistência à flexão, foi possível verificar uma diminuição de cerca de 27% no seu valor com a incorporação de 5% de PCM não encapsulado. No que diz respeito à resistência à compressão, o decréscimo observado foi de cerca de 26%. Este comportamento pode ser explicado pelo aumento da relação líquido/ligante das argamassas, o que provoca um aumento da porosidade e consequente diminuição das resistências à flexão e à compressão [31]. Este aumento da porosidade também pode ser demonstrado pelo aumento do volume de poros abertos, porosidade total e absorção de água por imersão, observado para as placas com incorporação de PCM e descrito na seção seguinte deste trabalho. Por outro lado, a incorporação de um PCM não encapsulado também pode afetar o processo de cura das argamassas à base de cimento, causando um atraso no processo de hidratação do ligante, o que novamente justifica a perda no desempenho mecânico verificada [24, 32].

Temperatura máxima e mínima. A Figura 3 permite observar a influência da incorporação de PCM nas temperaturas extremas durante a simulação da estação de verão e primavera, tendo sido possível observar uma menor temperatura máxima e maior temperatura mínima associada às células de testes revestidas com argamassas aditivadas com PCM. Verificou-se também que a presença de um maior teor de PCM originou um melhor desempenho térmico, devido a uma diminuição mais expressiva da temperatura máxima e um aumento mais significativo da temperatura mínima. No que diz respeito à estação de verão a incorporação de 20% de PCM não encapsulado provocou uma diminuição da temperatura máxima em cerca de 8% e um aumento da temperatura mínima em cerca de 2%. Na estação de primavera verificou-se uma diminuição da temperatura máxima em cerca de 8% e um aumento da temperatura mínima em cerca de 8%, com a incorporação de 20% de PCM não encapsulado.

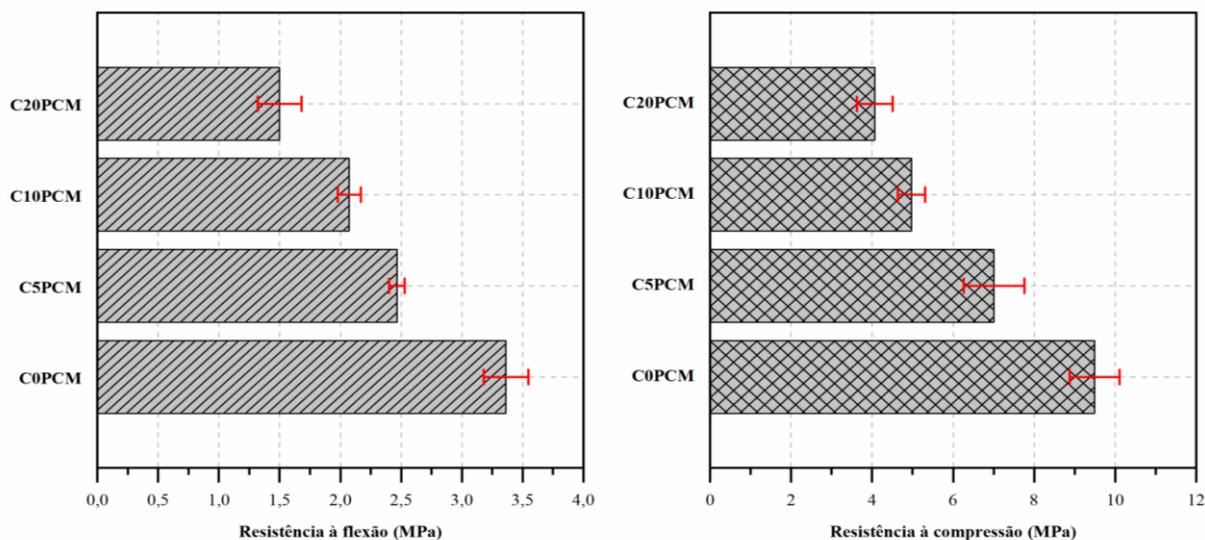


Figura 2: Resistência à flexão e compressão das argamassas.

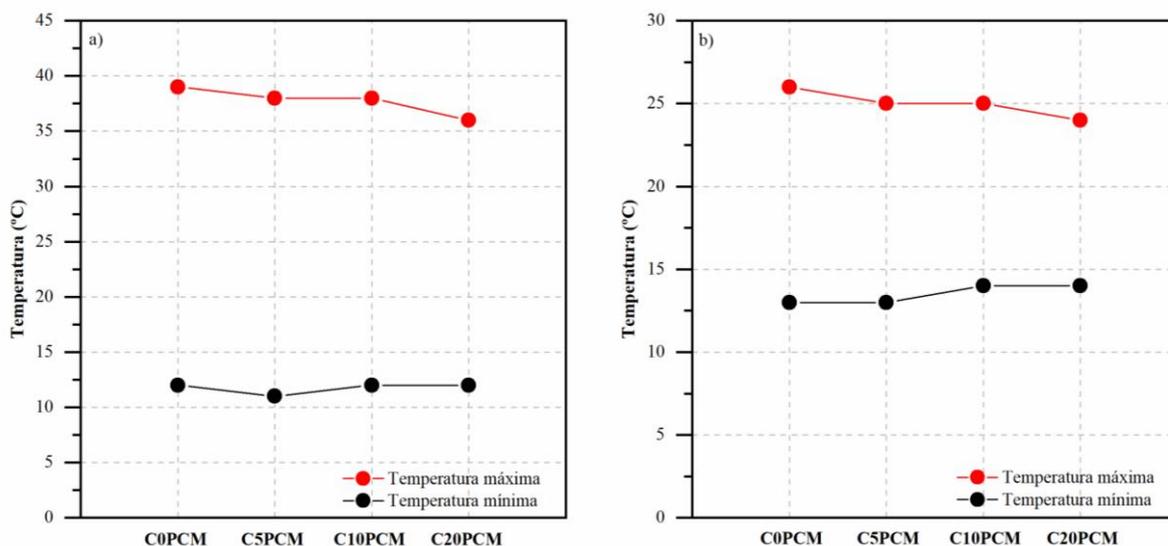


Figura 3: Temperatura máxima e mínima: a) Estação de verão; b) Estação de primavera.

Caracterização das placas

Volume de poros abertos. A Figura 4 revela que o volume de poros abertos aumenta com a presença de um maior teor de PCM. Comparando com as placas de referência, ou seja, sem incorporação de PCM, foi possível verificar que a incorporação de 5% de PCM originou um aumento no volume de poros abertos superior a 30%. Esse comportamento pode ser justificado pela geometria do protótipo das placas, que apresentam uma maior superfície exposta, permitindo maior facilidade de evaporação da água durante o processo de cura. Por outro lado, o PCM tem uma maior tendência a se deslocar para a superfície, o que também contribui para um aumento do volume de poros abertos, pois neste caso o PCM pode se deslocar do local onde foi aplicado, porém essa quantidade de PCM não é significativa. Este efeito pode ser chamado de “efeito de placa”.

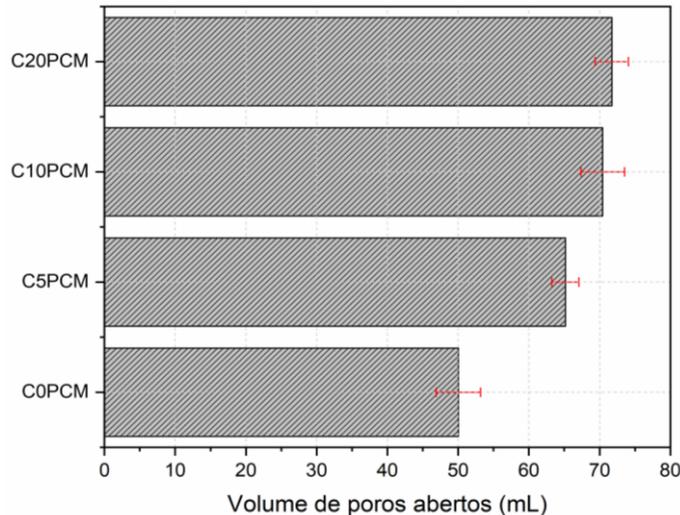


Figura 4: Volume de poros abertos das placas.

Massa volúmica real e aparente. Em relação à massa volúmica aparente e real (Tabela 2), foi possível verificar uma diminuição, com a incorporação de um maior teor de PCM nas argamassas. Relativamente à massa volúmica aparente, observou-se uma diminuição do seu valor superior a 11% com a incorporação de 5% de PCM, em comparação às placas de referência. Em relação à massa volúmica real observou-se que a diminuição registada não foi tão significativa, apenas cerca de 5%. É de notar que o comportamento observado para a massa volúmica aparente é influenciado pelo volume de poros abertos (Figura 4), sendo que quanto maior for este valor, menor será a massa volúmica aparente. Por outro lado, a diminuição da massa volúmica real é justificada pela menor massa volúmica do PCM, em comparação com a massa volúmica da areia utilizada. É também de salientar que a diminuição da relação água-ligante das argamassas (Figura 1) também contribuiu para os comportamentos descritos.

Tabela 2: Massa volúmica aparente e real das placas (kg/m^3)

Composição	Massa volúmica aparente	Massa volúmica real
C0PCM	1985.3	2294.8
C5PCM	1763.9	2203.9
C10PCM	1698.4	2183.5
C20PCM	1626.3	2158.9

Porosidade total. A Figura 5 apresenta a porosidade total das placas com incorporação de PCM, podendo-se observar que a porosidade total aumenta com a incorporação de PCM. Efetuando uma comparação entre a placa sem incorporação de PCM (0% PCM) e a placa com 5% de incorporação de PCM, observou-se um aumento na porosidade total de 48%, sendo de 65% e 76% para uma incorporação de 10% de PCM e 20% de PCM, respetivamente. Este comportamento pode ser explicado pela maior facilidade de evaporação da água, devido à maior superfície exposta das placas, o que se encontra relacionado com o “efeito de placa” anteriormente descrito, afetando principalmente a macroporosidade das placas.

Absorção de água. A absorção de água das placas desenvolvidas foi avaliada com base na absorção de água por capilaridade e imersão.

Relativamente à absorção de água por imersão (Figura 6) foi possível observar um aumento da mesma com a presença de um maior teor de PCM, sendo que a incorporação de 5%, 10% e 20% de PCM resultou num aumento na absorção de água por imersão de cerca de 3%, 7% e 21%, respetivamente. Este comportamento pode ser atribuído ao aumento da relação líquido/ligante nas argamassas que originaram as placas (Figura 1) e também pelo aumento do volume de poros abertos (Figura 4) e da porosidade total (Figura 5) nas placas com incorporação de PCM, o que consequentemente se encontra associado à presença de uma maior macroporosidade.

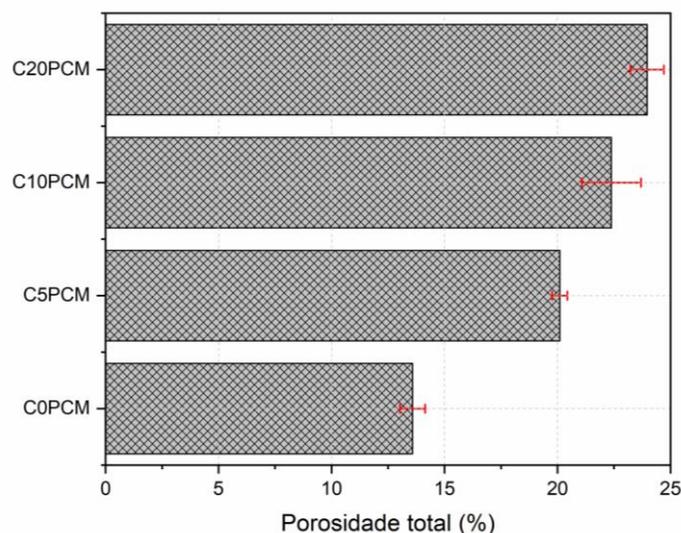


Figura 5: Porosidade total das placas.

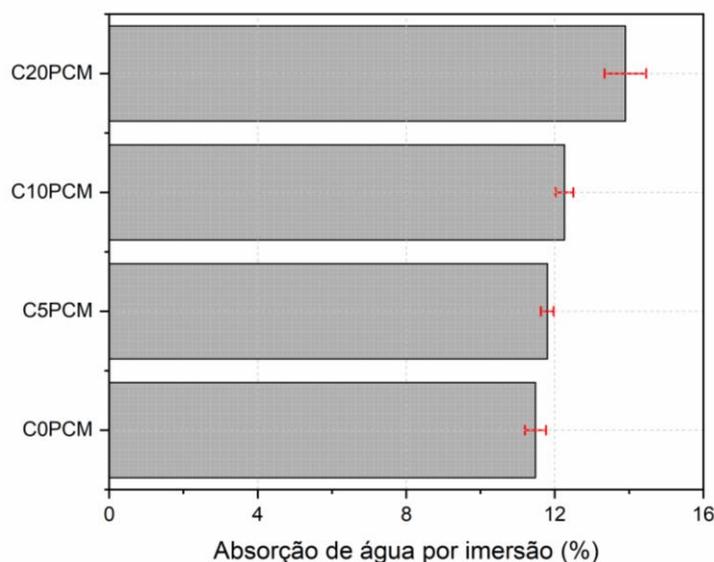


Figura 6: Absorção de água por imersão das placas.

A absorção de água por capilaridade permite obter informações sobre a microporosidade das placas. A Figura 7 apresenta o coeficiente de absorção de água por capilaridade das placas desenvolvidas. Foi possível observar um coeficiente de absorção de água por capilaridade semelhante para as placas com incorporação de 5% e 10% de PCM. No entanto, para uma incorporação de 20% de PCM, verificou-se uma diminuição de cerca de 25%. Relativamente à quantidade de água absorvida por capilaridade (Figura 8), mais uma vez pode-se observar que a incorporação de um maior teor de PCM conduziu a uma menor absorção de água. Este comportamento pode ser explicado pela existência de uma microestrutura mais compacta das argamassas e placas com incorporação de PCM, o que leva a uma diminuição da microporosidade das argamassas [32].

Resistência à flexão. De acordo com a Figura 9 foi possível observar uma diminuição na resistência à flexão das placas com a incorporação de PCM. A incorporação de 5% de PCM originou uma diminuição da resistência à flexão superior a 15%. Este comportamento pode ser justificado pelo aumento da quantidade de líquido presente nas argamassas que originaram as placas (Figura 1) e maior macroporosidade (Figura 5 e 6), proporcionada pela maior facilidade de evaporação da água devido ao efeito de placa, já descrito ao longo deste trabalho.

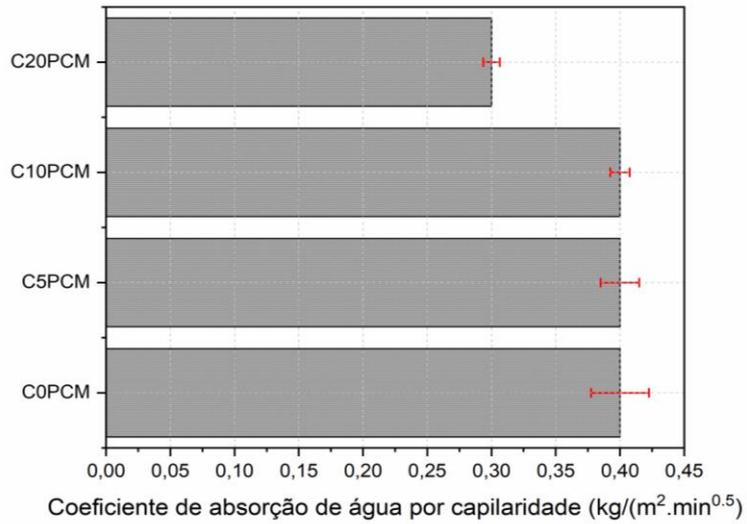


Figura 7: Coeficiente de absorção de água por capilaridade das placas.

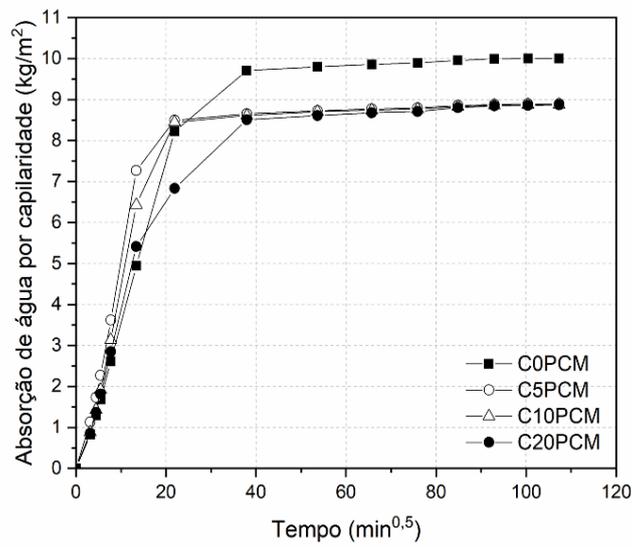


Figura 8: Absorção de água por capilaridade das placas.

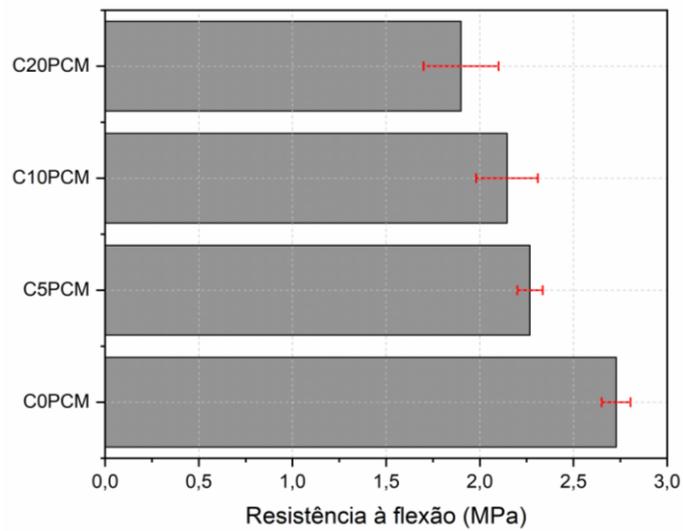


Figura 9: Resistência à flexão das placas.

Conclusão

Este estudo demonstra que é possível utilizar argamassas com incorporação de material de mudança de fase não encapsulado para a produção de placas. Contudo, a incorporação de PCM não encapsulado em argamassas e placas altera as suas propriedades do ponto de vista físico, mecânico e térmico.

Relativamente ao estudo das argamassas foi possível identificar os seguintes aspetos:

- A relação água/ligante diminui com a incorporação de um maior teor de PCM, devido ao fato deste material ser incorporado no estado líquido;

- A resistência à flexão e à compressão revelaram uma diminuição do seu valor com a incorporação de PCM, o que pode ser explicado pelo aumento da relação líquido/ligante, que provoca um aumento da macroporosidade das argamassas.

- A presença de PCM nas argamassas influencia as temperaturas extremas, observando-se uma diminuição da temperatura máxima e um aumento da temperatura mínima, tanto na estação de verão como na estação de primavera, sendo que as argamassas com maior teor de PCM apresentam um melhor desempenho. Este comportamento encontra-se diretamente relacionado com uma maior economia no consumo de energia elétrica nos edifícios que possuam esta tecnologia.

No que diz respeito à caracterização das placas foi possível observar os seguintes aspetos:

- O volume dos poros abertos, a porosidade total e a absorção de água por imersão revelam uma diminuição com a incorporação de um maior teor de PCM. Este comportamento pode ser justificado pela geometria da placa, uma vez que a superfície exposta durante o processo de cura é maior do que a superfície exposta nos provetes de argamassa, facilitando a evaporação da água não combinada quimicamente, efeito denominado como “efeito placa”.

- A massa volúmica aparente e real sofreram uma diminuição do seu valor com a incorporação de PCM, o que pode ser justificado pela maior macroporosidade das placas, causada pela presença do PCM e pelo “efeito placa”.

- A absorção de água por capilaridade diminuiu com a incorporação de PCM, devido à existência de uma microestrutura mais compacta das argamassas de PCM, no que diz respeito aos poros de menores dimensões.

- A resistência à flexão diminuiu com a incorporação de PCM não encapsulado, sendo que este comportamento encontra-se associado ao aumento da relação líquido/ligante nas argamassas e à maior macroporosidade causada pelo “efeito placa” descrito neste estudo.

Em suma, o comportamento das placas com incorporação de PCM é largamente influenciado pelas propriedades das argamassas que lhe dão origem. No entanto, em termos de comportamento mecânico, o desempenho das placas não foi afetado pela sua geometria, o que comprova que as dimensões selecionadas constituem uma possível solução para a pré-fabricação de materiais de construção obtidos com base em argamassas funcionais.

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.

Referências

- [1] Pordata, <https://www.pordata.pt/Europa>, em 26/09/2022.
- [2] G. Blengini and T. Carlo, *The changing role of life cycle phases, subsystems and materials in the LCA of low energy buildings*, Energy and Buildings, 42 (2010) 869-880.
- [3] S. Cunha, J. B. Aguiar and A. Tadeu, *Thermal performance and cost analysis of PCM mortars based in different binders*, Construction and Building Materials, 122 (2016) 637-648.

- [4] M. Kheradmand, M. Azenha, J. B. Aguiar and J. Castro-Gomes, *Experimental and numerical studies of hybrid PCM embedded in plastering mortar for enhanced thermal behaviour of buildings*, Energy, 94 (2016) 250-261.
- [5] T. Santos, M. Kolokotroni, N. Hopper and K. Yearley, *Experimental study on the performance of a new encapsulation panel for PCM's to be used in the PCM-Air heat exchanger*, Energy Procedia, 161 (2019) 352-359.
- [6] M. Bahrar, Z. Djamai, M. Mankibi, A. Larbi and 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.
- [7] R. Saxena, D. Rakshit and S. Kaushik, *Phase change material (PCM) incorporated bricks for energy conservation in composite climate: A sustainable building solution*, Solar Energy, 183 (2019) 276-284.
- [8] G. Zhou and J. He, *Thermal performance of a radiant floor heating system with different heat storage materials and heating pipes*, Applied Energy, 138 (2015) 648-660.
- [9] W. Cheng, B. Xie, R. Zhang, Z. Xu and Y. Xia, *Effect of thermal conductivities of shape stabilized PCM on under-floor heating system*, Applied Energy, 144 (2015) 10-18.
- [10] A. Entrop, H. Brouwers and A. Reinders, *Experimental research on the use of micro-encapsulated Phase Change Materials to store solar energy in concrete floors and to save energy in Dutch houses*, Solar Energy, 85 (2011) 1007-1020.
- [11] X. Jin and X. Zhang, *Thermal analysis of a double layer phase change material floor*, Applied Thermal Engineering, 31 (2011) 1576-1581.
- [12] H. Weinläder, W. Körner and B. Strieder, *A ventilated cooling ceiling with integrated latent heat storage-Monitoring results*, Energy and Buildings, 82 (2014) 65-72.
- [13] M. J. Abden, Z. Tao, Z. Pan, L. George and R. Wuhrer, *Inclusion of methyl stearate/diatomite composite in gypsum board ceiling for building energy conservation*, Applied Energy, 259 (2020) e114113.
- [14] S. Lu, B. Liang, X. Li, X. Kong, W. Jia and L. Wang, *Performance Analysis of PCM Ceiling Coupling with Earth-Air Heat Exchanger for Building Cooling*, Materials, 13 (2020) e2890.
- [15] S. Cunha and J. B. Aguiar, *Phase Change Materials and Energy Efficiency of Buildings: A Review of Knowledge*, Journal of Energy Storage, 27 (2020) e101083.
- [16] F. Kuznik, J. Virgone and J. Roux, *Energetic efficiency of room wall containing PCM wallboard: a full-scale experimental investigation*, Energy and Buildings, 40 (2008) 148-156.
- [17] M. Bake, A. Shukla and S. Liu, *Development of gypsum plasterboard embodied with microencapsulated phase change material for energy efficient buildings*, Materials Science and Technology, 4 (2021) 166-176.
- [18] O. Gencel, A. Ustaoglu, A.t Benli, G. Hekimoglu, A. Sarı, E. Erdogmus, M. Sutcu, G. Kaplan and O. Y. Bayraktar, *Investigation of physico-mechanical, thermal properties and solar thermoregulation performance of shape-stable attapulgite based composite phase change material in foam concrete*, Solar Energy, 236 (2022) 51-62.
- [19] M. Ahmad, A. Bontemps, H. Sallée and D. Quenard, *Thermal Testing and Numerical Simulation of a Prototype Cell Using Light Wallboards Coupling Vacuum Isolation Panels and Phase Change Material*, Energy and Buildings, 38 (2006) 673-681.

- [20] A. Castell, I. Martorell, M. Medrano, G. Pérez and L.F. Cabeza, *Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling*, Energy and Buildings, 42 (2010) 534-540.
- [21] L. Shilei, Z. Neng and F. Guohui, *Impact of Phase Change Wall Room on Indoor Thermal Environment in winter*, Energy and Buildings, 38 (2006) 18-24.
- [22] L. Shilei, F. Guohui, Z. Neng and D. Li, *Experimental study and evaluation of latent heat storage in phase change materials wallboards*, Energy and Buildings, 39 (2007) 1088-1091.
- [23] K. Lin, Y. Zhang, X. Xu, H. Di, R. Yang and P. Qin, *Experimental Study of Under-Floor Electric Heating System with Shape-Stabilized PCM Plates*, Energy and Buildings, 37 (2005) 215-220.
- [24] S. Cunha, M. Lima and J. B. Aguiar, *Influence of adding phase change materials on the physical and mechanical properties of cement mortars*, Construction and Building Materials, 127 (2016) 1-10.
- [25] European Committee for Standardization (CEN), EN 1015-3, Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table), (1999).
- [26] European Committee for Standardization (CEN), EN 1015-11, Methods of Test for Mortar for Masonry – Part 11: Determination of Flexural and Compressive Strength of Hardened Mortar, (1999).
- [27] Instituto Português da Qualidade (IPQ), NP EN 1936, Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação da massa volúmica real e aparente e da porosidade total e aberta, (2008).
- [28] Instituto Português da Qualidade (IPQ), NP EN 13755, Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação da absorção de água à pressão atmosférica, (2008).
- [29] Instituto Português da Qualidade (IPQ), NP EN 1925, Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação do coeficiente de absorção de água por capilaridade, (2000).
- [30] Instituto Português da Qualidade (IPQ), NP EN 12372, Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação da resistência à flexão sob carga centrada, (2008).
- [31] S. Cunha, P. Leite and J. B. Aguiar, *Characterization of innovative mortars with direct incorporation of phase change materials*, Journal of Energy Storage, 30 (2020) e101439.
- [32] S. Cunha, M. Silva and J. B. Aguiar, *Behavior of cementitious mortars with direct incorporation of non-encapsulated phase change material after severe temperature exposure*, Construction and Building Materials, 230 (2020) e117011.
- [33] S. Cunha, J. B. Aguiar and V. Ferreira, *Eco-efficient mortars with incorporation of Phase Change Materials*, Journal of Building Physics, 41 (2018) 469-492.