

## ARGAMASSAS DE CIMENTO COM INCORPORAÇÃO DE MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE

Sandra Cunha<sup>1\*</sup>, Marine Lima<sup>2</sup>, José Aguiar<sup>1</sup>, Victor Ferreira<sup>3</sup>, António Tadeu<sup>4</sup>

1: Universidade do Minho  
Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal  
sandracunha86@gmail.com, aguiar@civil.uminho.pt

2: Université de Nantes  
Rue Michel Ange, 58, BP 420, 44606 Saint Nazaire, France  
marine-23-02@hotmail.fr

3: Universidade de Aveiro  
Campus Universitário de Santiago, 3810-193 Aveiro, Portugal  
victorf@ua.pt

4: Universidade de Coimbra  
Rua Luís Reis Santos - Pólo II da Universidade, 3030-788 Coimbra, Portugal  
tadeu@dec.uc.pt

**Palavras-chave:** Argamassas, Material de Mudança de Fase, Características físicas, Características mecânicas

**Resumo.** *A eficiência energética dos edifícios é atualmente um dos principais objetivos da política energética a nível regional, nacional e internacional. Os edifícios são um dos setores líderes no consumo de energia nos países desenvolvidos, sendo que na União Europeia representam cerca de 40% do consumo de energia e emissões de CO<sub>2</sub> para a atmosfera. Soluções baseadas em fontes de energia renováveis contribuem para o aumento da eficiência energética, diminuição da utilização das reservas de combustíveis fósseis e redução da emissão de gases poluentes para a atmosfera. Assim, a utilização de fontes de energia renováveis, tais como a energia solar, é um fator chave na redução da dependência energética dos edifícios e constitui uma medida crucial para a promoção da sustentabilidade dos mesmos. O armazenamento térmico conseguido através da utilização de materiais de mudança de fase (PCM) constitui uma estratégia para o desenvolvimento de edifícios com elevado desempenho térmico. Durante os últimos anos, vários estudos sobre materiais de construção com incorporação de PCM microencapsulado e macroencapsulado têm vindo a ser publicados. No entanto, a utilização de PCM não encapsulado é uma das principais lacunas do conhecimento nesta área. É importante notar que a utilização de PCM não encapsulado permite a utilização do material no seu estado puro, reduzindo os impactos ambientais associados ao seu tratamento e reduzindo o seu custo no mercado, o que consequentemente origina uma redução do custo das soluções construtivas em que é aplicado. Desta forma, o principal objetivo deste trabalho consistiu no estudo das propriedades físicas e mecânicas de argamassas de cimento com incorporação de PCM não-encapsulado, tendo sido possível concluir que a utilização de PCM nesta forma em argamassas pode ser vista como uma solução económica e funcional para a melhoria da eficiência energética dos edifícios.*

## 1. INTRODUÇÃO

O rápido crescimento económico mundial levou a um aumento no consumo de energia. Atualmente, os combustíveis fósseis dominam o mercado mundial de energia em cerca de 81%. Contudo, os combustíveis fósseis estão a esgotar-se rapidamente e apresentam custos de extração e comercialização bastante elevados. Por outro lado, a sua exploração encontra-se relacionada com a emissão de gases para o meio ambiente, o que consequentemente origina sérios problemas ambientais [1]. Assim, a utilização eficiente da energia e a possibilidade da utilização de fontes de energia renováveis são cada vez mais importantes.

A eficiência energética dos edifícios é hoje um dos principais objetivos da política energética regional, nacional e internacional [2]. Na União Europeia, os edifícios representam 40% do consumo de energia e emissões de CO<sub>2</sub> para a atmosfera. Assim, soluções construtivas baseadas na utilização de energias renováveis, contribuem para o aumento da eficiência energética dos edifícios, redução da utilização das reservas de combustíveis fósseis e redução das emissões de gases poluentes para a atmosfera.

A utilização de fontes de energia renováveis, tais como a energia solar, são fundamentais para a promoção da eficiência energética e sustentabilidade dos edifícios. Por outro lado, a utilização de fontes de energia renováveis é um fator chave na redução da dependência energética dos edifícios. Portanto, o armazenamento de calor através de materiais de mudança de fase (PCM) é uma estratégia para o desenvolvimento de projetos de construção com elevado desempenho energético.

Os materiais de mudança de fase possuem a capacidade de alterar o seu estado em função da temperatura ambiente. Quando a temperatura ambiente que rodeia o PCM aumenta e ultrapassa o ponto de fusão do material, o PCM passa do estado sólido para estado líquido, absorvendo e armazenando energia calorífica ambiente. Por outro lado, quando a temperatura ambiente baixa, atingindo o ponto de solidificação do PCM, este altera novamente de estado, neste caso do estado líquido para o estado sólido, libertando a energia anteriormente armazenada [3-4].

O PCM pode ser incorporado em materiais de construção utilizando diferentes métodos, tais como o encapsulamento, estabilização, incorporação direta e imersão [1]. A incorporação direta é o método mais simples para a utilização do PCM, sendo que o material é diretamente misturado com os materiais de construção durante a sua produção. No entanto, ainda pouco se conhece acerca das potencialidades dos materiais desenvolvidos com base nesta técnica. Por sua vez, a imersão consiste em mergulhar os produtos de construção em PCM líquido, de forma a que estes absorvam o material por capilaridade [5]. Por outro lado, na técnica de estabilização, o PCM e o material de suporte são fundidos e misturados a uma temperatura elevada, seguido de um arrefecimento do material de suporte, até que a mistura se torne sólida [1]. Por último, o encapsulamento é o método mais utilizado, sendo que existem duas principais formas de encapsulamento: microencapsulamento e macroencapsulamento [6]. Deve notar-se que, atualmente, ainda existem custos elevados relacionados com este processo tornando-se assim urgente o desenvolvimento de novos materiais de construção com base em técnicas e matérias-primas, com elevado desempenho térmico e baixo custo de aquisição. É imperativo o desenvolvimento de argamassas de revestimento interior com incorporação de PCM com base em matérias-primas de baixo custo, tais como o PCM não-encapsulado, contrariando assim os elevados custos de produção de materiais com incorporação de PCM macroencapsulado ou microencapsulado.

Durante os últimos anos têm sido publicados vários estudos de materiais de construção com incorporação de PCM encapsulado. As placas de gesso com incorporação de microcápsulas de PCM foram um dos principais materiais de construção estudados, devido ao seu baixo custo e facilidade de aplicação [7-9]. A incorporação de microcápsulas de PCM em betão e argamassas também foi alvo de investigação [10-13]. Existem também outros estudos com incorporação de PCM em materiais de construção, como por exemplo painéis de PVC, blocos e tijolos [14-16].

O principal objetivo deste trabalho consistiu no estudo da influência da incorporação de PCM não-encapsulado em argamassas à base de cimento, avaliando as suas principais propriedades físicas e

mecânicas. Foram realizados ensaios em 4 composições diferentes e em 3 gamas de temperatura diferentes (10°C, 25°C e 40°C). Foram avaliadas várias propriedades das argamassas no estado fresco e endurecido, tais como: trabalhabilidade, densidade, absorção de água por capilaridade, absorção de água por imersão, microestrutura, resistência à flexão e resistência à compressão.

## 2. MATERIAIS, COMPOSIÇÕES E FABRICO

### 2.1. Materiais

Foram desenvolvidas várias argamassas à base de cimento, com o intuito de avaliar a influência da adição de PCM não-encapsulado, nas suas principais propriedades físicas e mecânicas. A seleção dos materiais utilizados teve em consideração trabalhos anteriores [4, 14, 15, 17].

A areia utilizada apresentou um tamanho médio de partícula de 439,9  $\mu\text{m}$  e uma massa volúmica de 2600  $\text{kg}/\text{m}^3$ . O superplastificante utilizado é baseado em poliacrilato, com densidade de 1050  $\text{kg}/\text{m}^3$ . As fibras utilizadas são fibras sintéticas de poliamida, com um comprimento de 6 mm e massa volúmica de 1380  $\text{kg}/\text{m}^3$ . O cimento utilizado foi um cimento Portland CEM II B-L 32.5N com uma massa volúmica de 3030  $\text{kg}/\text{m}^3$ . Finalmente, o PCM utilizado é não-encapsulado, composto por parafina com uma temperatura de transição entre 20-23 °C, entalpia de 200 kJ/kg, massa volúmica no estado sólido de 760  $\text{kg}/\text{m}^3$  e massa volúmica no estado líquido de 700  $\text{kg}/\text{m}^3$  [18].

### 2.2. Formulações

Foram desenvolvidas 4 formulações distintas com base em diferentes teores de PCM, as quais se apresentam na Tabela 1. Estas composições foram avaliadas desde o estado fresco até 28 dias de idade. O teor de PCM foi fixado em 0%, 2.5%, 5% e 7.5% da massa de agregado.

Tabela 1. Formulação das argamassas ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

Composição	Cimento	Areia	PCM	Superplastificante	Fibras	Água
CEM-0PCM	500	1279.4	0	15	5	325
CEM-2.5PCM	500	1289.6	32.2	15	5	275
CEM-5PCM	500	1243.5	62.2	15	5	250
CEM-7.5PCM	500	1204	90.3	15	5	225

### 2.3. Procedimentos de ensaio

As argamassas desenvolvidas foram avaliadas no estado fresco e endurecido. No estado fresco foi determinada a trabalhabilidade. Sendo que no estado endurecido foi determinada a densidade, absorção de água por capilaridade, absorção de água por imersão, microestrutura, resistência à flexão e resistência à compressão.

Os ensaios no estado endurecido foram realizados submetendo os provetes durante 24 horas a três temperaturas ambientes distintas, com recurso a um forno e uma câmara climática. As temperaturas testadas foram 25°C (temperatura de referência), 10°C e 40°C. A seleção das temperaturas de exposição dos provetes teve em consideração a temperatura de transição do PCM. Sendo que, os ensaios foram realizados com PCM no estado sólido (10°C), com o PCM no estado de transição (25°C) e com o PCM no estado líquido (40°C). Assim, foi possível avaliar a influência da adição de PCM não-encapsulado em argamassas, mas também a influência do estado do PCM nas propriedades físicas e mecânicas das mesmas.

Os ensaios de trabalhabilidade foram realizados com o objetivo de conferir uma trabalhabilidade adequada à aplicação das argamassas desenvolvidas, tendo sido realizados com base no método da mesa de espalhamento, especificado pela norma europeia EN 1015-3 [19]. O valor resultante do ensaio apenas foi considerado quando compreendido entre 155-165 mm.

O processo de fabrico dos provetes foi efetuado de acordo com norma EN 1015-11 [20]. Após o seu fabrico, todos os provetes foram conservados durante 7 dias em sacos de polietileno, sendo

posteriormente colocados em laboratório à temperatura ambiente (cerca de 22°C) durante 21 dias.

A observação da microestrutura das argamassas foi realizada com recurso a um microscópio eletrónico de varrimento. Para cada composição, foram preparadas duas amostras cilíndricas com diâmetro e altura de cerca de 1 cm.

Os produtos resultantes do processo de hidratação do cimento foram avaliados com base em testes termogravimétricos (DSC-TGA), em atmosfera de argon, com um fluxo de 100 ml/min e uma taxa de aquecimento de 10 °C/min, numa gama de temperatura compreendida entre 22°C e 1000°C.

A absorção de água por capilaridade foi efetuada com base na norma EN 1015-18 [21]. A determinação da absorção de água por imersão foi efetuada com base na especificação do LNEC E 394 [22]. Os elementos de ensaio foram obtidos por corte, resultando assim em seis elementos de ensaio.

A avaliação da resistência à flexão e compressão foi efetuada com base na norma europeia EN 1015-11 [20]. Para o comportamento em flexão foram utilizados provetes prismáticos com dimensões de 40x40x160mm<sup>3</sup>. Os ensaios foram realizados com controlo de força, a uma velocidade de 50N/s. O comportamento em compressão foi avaliado efetuando a aplicação da carga no provete com recurso a uma peça metálica, suficientemente rígida para uniformizar a carga vertical. Os provetes utilizados para o ensaio foram as metades resultantes dos ensaios de flexão. Os ensaios foram realizados com controlo de força, a uma velocidade de 150N/s.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Trabalhabilidade

De acordo com a Figura 1 foi possível verificar que a incorporação de 2.5% de PCM não-encapsulado provocou uma diminuição na quantidade de água das argamassas superior a 15%. Por outro lado, com base na Figura 2 foi possível observar que a incorporação de PCM não-encapsulado não causou alterações significativas na razão líquido-ligante. Este comportamento pode ser justificado pela utilização de PCM no estado líquido, que em parte funciona como um agente para a formação de uma pasta homogénea, substituindo parte da água de amassadura.

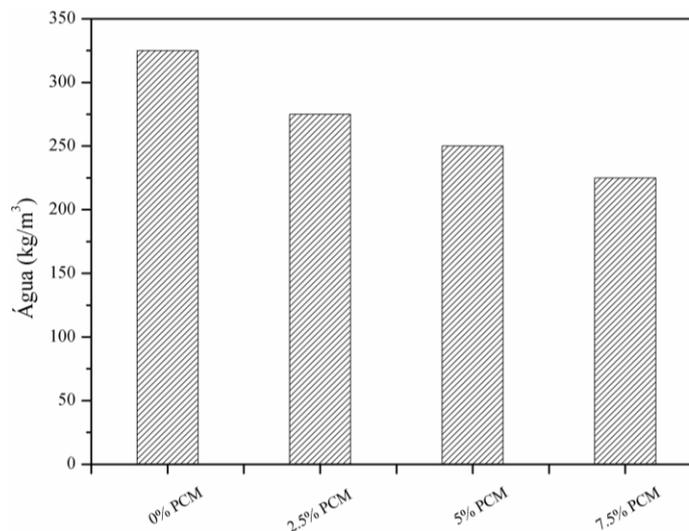


Figura 1. Teor de água adicionado às argamassas.

#### 3.2. Massa volúmica

De acordo com a Figura 3, foi possível observar que a incorporação de PCM não-encapsulado não

alterou de forma significativa a massa volúmica das argamassas desenvolvidas, mesmo quando testadas em diferentes gamas de temperaturas, uma vez que a massa volúmica do PCM no estado líquido e no estado sólido é semelhante.

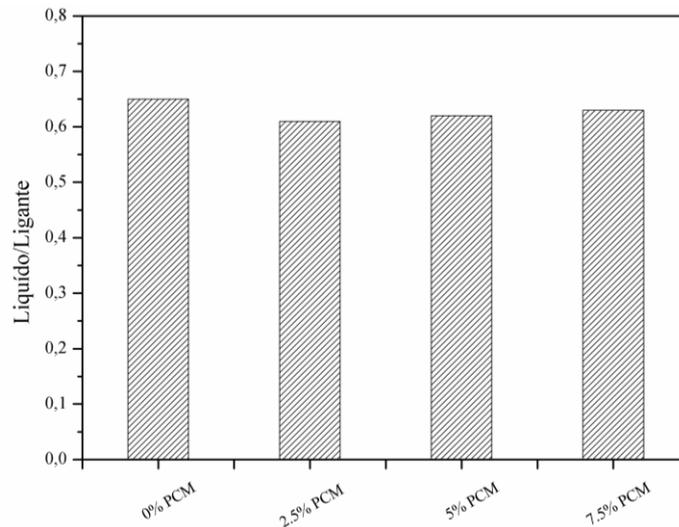


Figura 2. Relação líquido-ligante das argamassas.

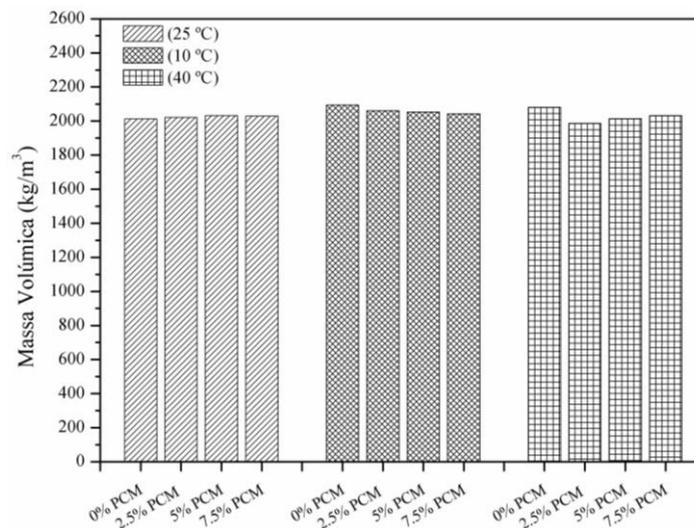


Figura 3. Massa volúmica das argamassas em diferentes gamas de temperaturas.

### 3.3. Absorção de água por capilaridade

Com base na Figura 4 foi possível verificar que a incorporação de PCM não-encapsulado originou uma diminuição do coeficiente de absorção de água por capilaridade superior a 73%. Este comportamento pode ser explicado pela ocupação total ou parcial dos poros da argamassa pelo PCM. Verificou-se também que as argamassas com incorporação de PCM apresentam um coeficiente de absorção de água por capilaridade semelhante quando submetidas a diferentes gamas de temperaturas. Assim, é possível verificar que mesmo em diferentes estados (sólido e líquido) o PCM não se move da matriz da argamassa. Em relação às argamassas de referência (0% PCM), foi

possível observar um coeficiente de absorção de água por capilaridade mais elevado, devido à presença de poros vazios na matriz das mesmas.

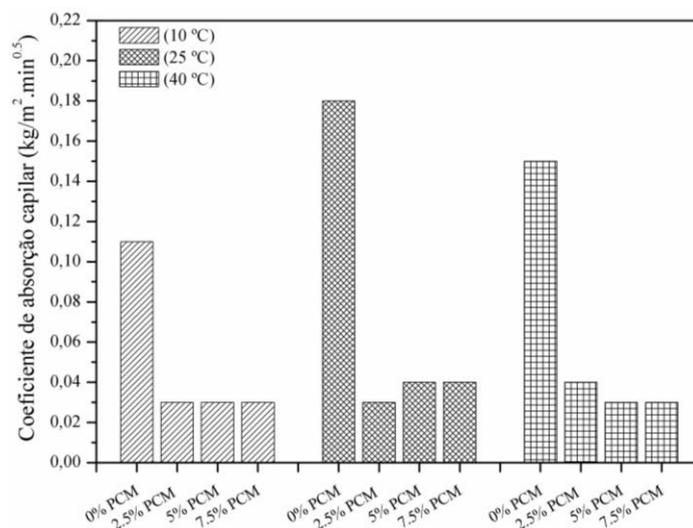


Figura 4. Coeficiente de absorção de água por capilaridade das argamassas em diferentes gamas de temperaturas.

A Figura 5 mostra o comportamento das argamassas durante 7 dias de ensaio. De acordo com os resultados obtidos foi possível observar que as argamassas sem incorporação de PCM apresentam elevada capacidade de absorção de água, devido a uma maior quantidade de poros livres na sua microestrutura. Foi ainda possível observar uma capacidade de absorção de água ligeiramente diferente, tendo em conta a temperatura ambiente. As argamassas quando submetidas a baixas temperaturas (10 °C) apresentam uma menor capacidade de absorção de água por ação capilar, devido ao PCM estar no estado sólido, diminuindo a capacidade de penetração de água nos poros das argamassas. Por outro lado, as argamassas quando submetidos a temperaturas que permitem que a transição do PCM do estado sólido para o estado líquido (25 °C e 40 °C) apresentaram uma maior capacidade de absorção de água por capilaridade, devido ao menor volume que o PCM ocupa nos poros da argamassa.

### 3.4. Absorção de água por imersão

A Figura 6 apresenta a absorção de água por imersão das diferentes argamassas quando expostas a diferentes gamas de temperaturas. Foi possível observar uma diminuição da absorção de água por imersão com a incorporação de 2.5% de PCM não-encapsulado superior a 17%. Foi ainda possível verificar que a exposição das argamassas a temperaturas baixas (10°C) originou um nível de absorção de água inferior, o que pode ser explicado pelo PCM se encontrar no estado sólido no interior dos poros das argamassas.

### 3.5. Microestrutura

As observações efetuadas com recurso ao microscópio eletrónico de varredura permitiram observar a microestrutura de argamassas à base de cimento, com a incorporação de diferentes teores de PCM não-encapsulado (Figura 7). Estas observações revelaram uma boa ligação entre os diferentes materiais constituintes das argamassas (PCM, fibras, agregados e ligantes), evidenciado pela ausência de fissuras na microestrutura das mesmas, o que demonstra um processo de mistura e cura das argamassas adequado.

Outras observações foram realizadas a fim de avaliar a distribuição dos poros nas diferentes

argamassas. Nas argamassas com incorporação de PCM foi observada uma diminuição na quantidade e dimensão dos poros (Figura 8). A argamassa com incorporação de 7.5% de PCM apresenta uma microestrutura mais compacta quando comparada com a argamassa de referência (0% PCM). Este comportamento pode ser explicado pela diminuição do teor de água presente nas argamassas com incorporação de PCM. Foi também possível identificar que as argamassas sem incorporação de PCM apresentam uma microestrutura mais cristalina, resultante da hidratação do cimento, quando comparada com as argamassas com incorporação de PCM. Este comportamento pode ser justificado pela diminuição da quantidade de água e pela dificuldade de contacto entre as partículas de cimento e água devido à presença do PCM.

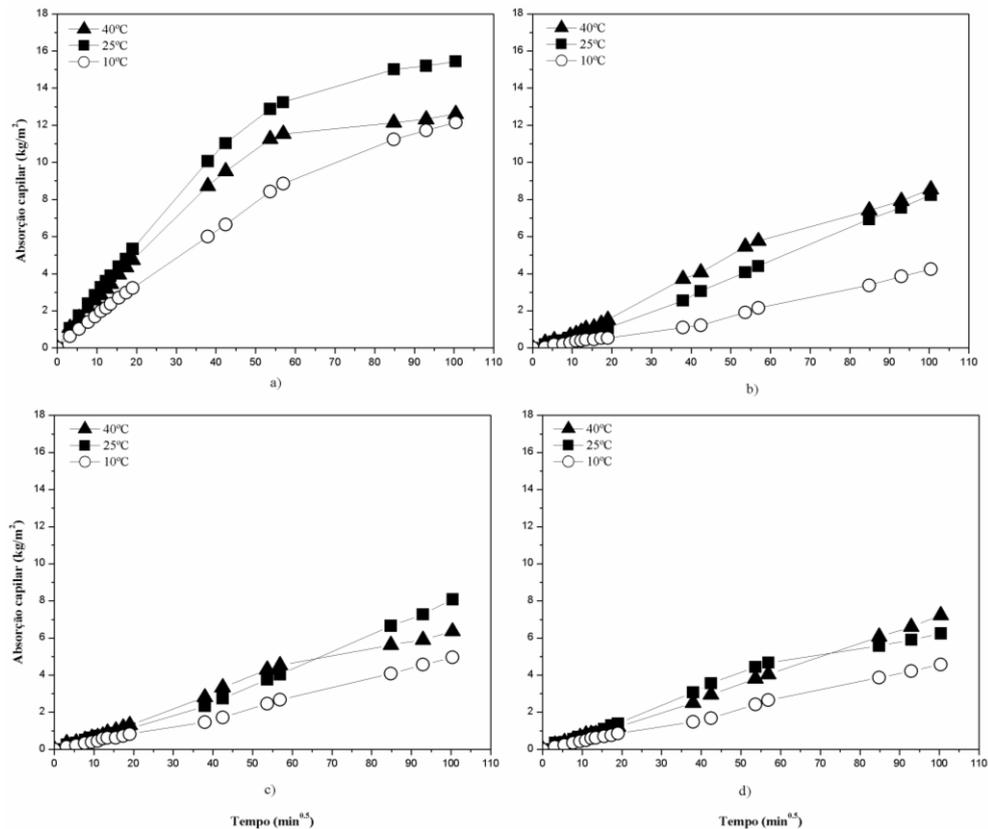


Figura 5. Absorção de água por capilaridade em diferentes gamas de temperaturas das seguintes argamassas: a) argamassa de referência (0% PCM); b) argamassa com incorporação de 2.5% PCM; c) argamassa com incorporação de 5% PCM; d) argamassa com incorporação de 7.5% PCM.

### 3.6. Resistência à flexão e compressão

A Figura 9 mostra o comportamento à flexão e compressão das argamassas quando expostas a diferentes gamas de temperaturas. Foi possível observar que a incorporação de 2,5% de PCM não-encapsulado não causou alterações significativas no comportamento à flexão e compressão. Esta situação pode ser explicada pelo PCM contido no interior dos poros, não enfraquecer a resistência mecânica.

As argamassas foram classificadas de acordo com a especificação NP EN 998-1 (Tabela 2) [24]. Observou-se que as argamassas desenvolvidas apresentaram a classificação máxima prevista na norma (CSIV). Assim, é possível obter uma argamassa com incorporação de PCM não encapsulado com um comportamento mecânico apropriado.

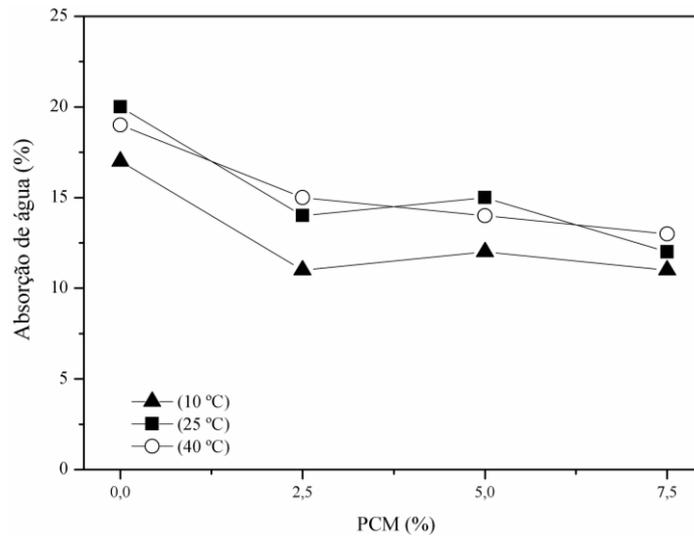


Figura 6. Absorção de água por imersão das argamassas em diferentes gamas de temperaturas.

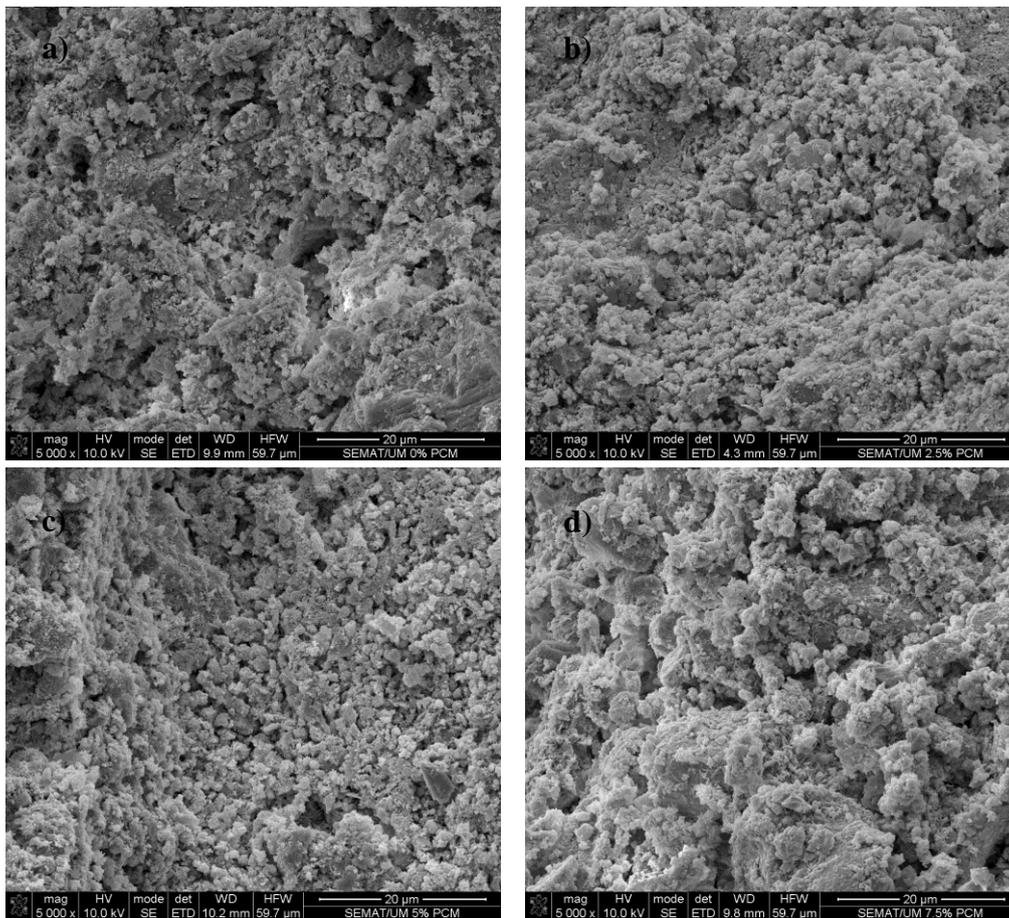


Figura 7. Microestrutura das argamassas (5000x): a) 0% PCM; 2.5% PCM; 5% PCM; 7.5% PCM.

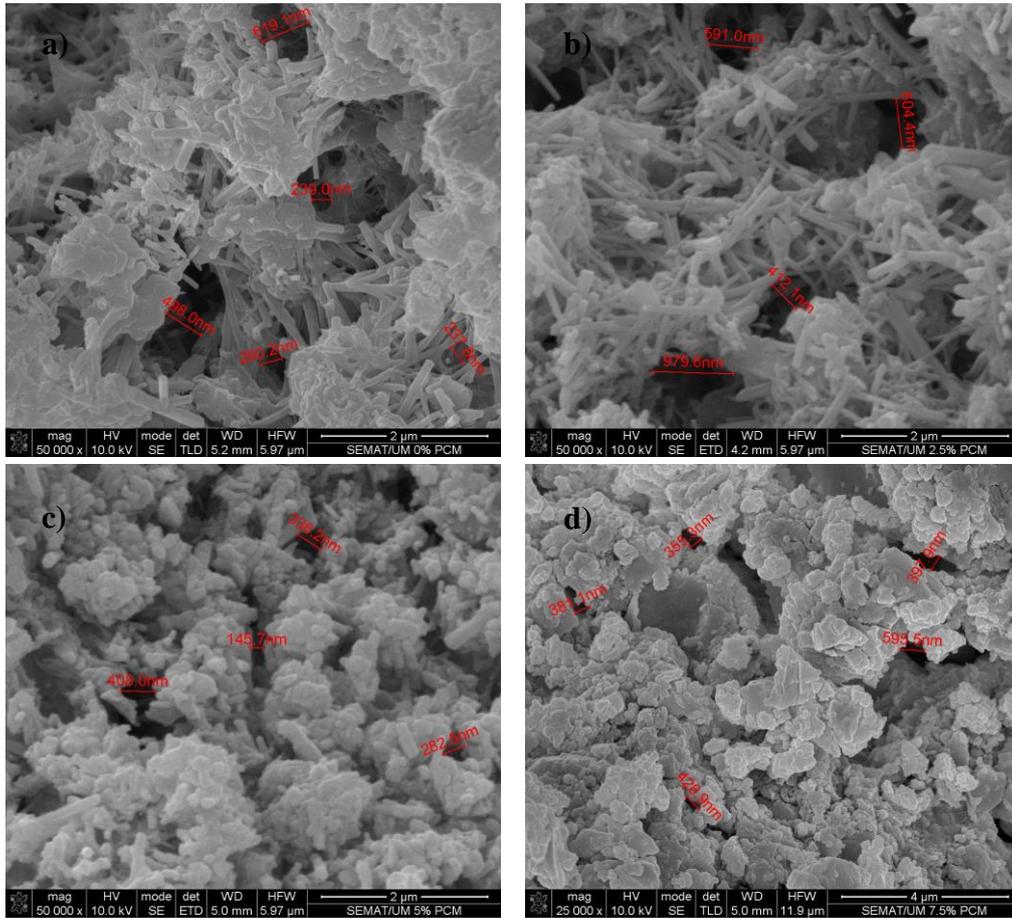


Figura 8. Microestrutura das argamassas (50000x): a) 0% PCM; 2.5% PCM; 5% PCM; 7.5% PCM.

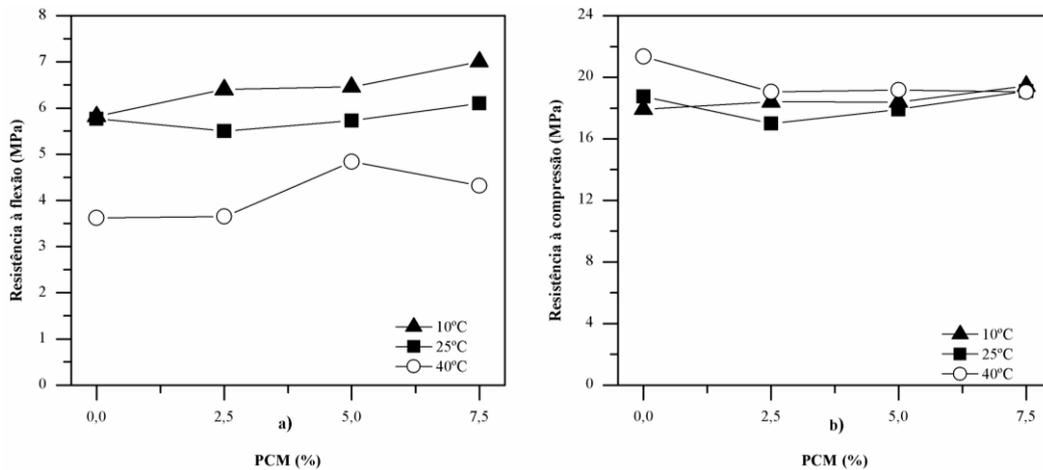


Figura 9. Resistência à flexão e compressão das argamassas em diferentes gamas de temperaturas.

Tabela 2. Classificação das argamassas segundo a especificação NP EN 998-1:2010.

Composição	Temperatura Ambiente (°C)	Resistência à Compressão (MPa)	Classificação NP EN 998-1:2010
CEM-0PCM	10	19.93	CSIV
CEM-2.5PCM		18.40	
CEM-5PCM		18.39	
CEM-7.5PCM		19.43	
CEM-0PCM	25	18.76	CSIV
CEM-2.5PCM		17.00	
CEM-5PCM		17.92	
CEM-7.5PCM		19.11	
CEM-0PCM	40	21.34	CSIV
CEM-2.5PCM		19.06	
CEM-5PCM		19.17	
CEM-7.5PCM		19.04	

#### 4. CONCLUSÃO

A realização desta investigação permitiu concluir que a incorporação de material de mudança de fase não-encapsulado em argamassas para revestimento no interior dos edifícios provoca ligeiras alterações nas suas propriedades no estado fresco e endurecido.

A incorporação de PCM não-encapsulado provoca uma diminuição na quantidade de água adicionada à mistura. No entanto, a razão líquido-ligante presente nas argamassas é semelhante, o que indica que todas as argamassas desenvolvidas requerem uma quantidade semelhante de líquido (água e PCM) de forma a obter uma pasta homogénea.

No que diz respeito à microestrutura das argamassas, foi possível concluir que a incorporação de PCM não-encapsulado origina uma diminuição da porosidade das mesmas. Por outro lado, as argamassas desenvolvidas apresentam uma boa compatibilidade entre todos os materiais que as constituem.

Em relação à absorção de água por capilaridade, foi possível observar que a incorporação de PCM não encapsulado originou uma diminuição do coeficiente de absorção capilar, devido à ocupação total ou parcial dos poros da argamassa pelo PCM. A absorção de água por imersão apresenta uma diminuição com a incorporação de PCM não encapsulado. Contudo, o comportamento das argamassas com incorporação de PCM não encapsulado é semelhante. No entanto, algumas alterações podem ser detetadas tendo em consideração a gama de temperatura ambiente (10°C, 25°C e 40°C) em que as argamassas foram expostas. Estas alterações estão relacionadas com o estado do PCM no interior dos poros das argamassas.

De acordo com as resistências à flexão e à compressão, pode-se concluir que a incorporação de PCM não encapsulado não causou alterações significativas no comportamento mecânico das argamassas. Por outro lado, as argamassas desenvolvidas apresentaram uma elevada classe de resistência, tendo em conta o comportamento em compressão. Assim, é possível concluir que a utilização de materiais de mudança de fase não encapsulados pode ser visto como uma solução viável e económica para a eficiência energética dos edifícios.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores desejam agradecer o apoio financeiro fornecido pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), através da bolsa de doutoramento SFRH/BD/95611/2013.

## REFERÊNCIAS

- [1] S. A. Memon, "Phase change materials integrated in building walls: A state of the art review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 31, pp. 870–906, 2014.
- [2] N. Soares, J. Costa, A. Gaspar, P. Santos, "Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings energy efficiency", *Energy and Buildings*, vol. 59, pp. 82–103, 2013.
- [3] Y. Zhang, G. Zhou, K. Lin, K. Zhang, H. Di, "Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook", *Building and Environment*, vol. 42, pp. 2197–2209, 2007.
- [4] B. Zalba, J. Marín, L. Cabeza, H. Mehling, "Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications", *Applied Thermal Engineering*, vol. 23, pp. 251–283, 2003.
- [5] L. Cabeza, A. Castell, C. Barreneche, A. Gracia, A. Fernández, "Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 1675–1695, 2011.
- [6] D. Hawes, D. Banu, D. Feldman, "Latent heat storage in concrete", *Solar Energy Materials*, vol. 19, pp. 335–348, 1989.
- [7] G. Fang, F. Tang, L. Cao, "Preparation, thermal properties and applications of shape-stabilized thermal energy storage materials", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 40, pp. 237–259, 2014.
- [8] A. K. Athienitis, C. Liu, D. Hawes, D. Banu, D. Feldman, "Investigation of the Thermal Performance of a Passive Solar Test-Room with Wall Latent Heat Storage", *Building and Environment*, vol. 32, pp. 405–410, 1997.
- [9] L. Shilei, Z. Neng, F. Guohui, "Impact of Phase Change Wall Room on Indoor Thermal Environment in winter", *Energy and Buildings*, vol. 38, pp. 18–24, 2006.
- [10] K. Darkwa, P. O'Callaghan, D. Tetlow, "Phase-change drywalls in a passive-solar building", *Applied Energy*, vol. 83, pp. 425–435, 2006.
- [11] C. Lai, R.H. Chen, C. Lin, "Heat transfer and thermal storage behaviour of gypsum boards incorporating micro-encapsulated PCM", *Energy and Buildings*, vol. 42, pp. 1259–1266, 2010.
- [12] A.G. Entrop, H.J.H. Brouwers, A.H.M.E. 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*, vol. 85, pp. 1007–1020, 2011.
- [13] S. Cunha, V. Alves, J. B. Aguiar, V. M. Ferreira, "Use of phase change materials microcapsules in aerial lime and gypsum mortars", *Cement Wapno Beton, Special Issue*, pp. 17–21, 2012.
- [14] S. Cunha, J. B. Aguiar, V. M. Ferreira, A. Tadeu, "Influence of Adding Encapsulated Phase Change Materials in Aerial Lime based Mortars", *Advanced Materials Research*, vol. 687, pp. 255–261, 2013.
- [15] S. Cunha, J. B. Aguiar, V. M. Ferreira, A. Tadeu, "Mortars based in different binders with incorporation of phase change materials: Physical and mechanical properties", *European Journal of Environmental Civil Engineering*, vol. 19, pp. 1216–1233, 2015.
- [16] M. Ahmad, A. Bontemps, H. Sallée, 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*, vol. 38, pp. 673–681, 2006.

- [17] S. Cunha, J. B. Aguiar, V. M. Ferreira, A. Tadeu, "Influence of the type of phase change materials microcapsules on the properties of lime-gypsum thermal mortars", *Advanced Engineering Materials*, vol. 16, pp. 433-441, 2014.
- [18] Rubitherm, RT22HC, <http://www.rubitherm.eu/en/index.php/productcategory/organische-pcm-rt>, accessed: December, 2015.
- [19] European Committee for Standardization (CEN), EN 1015-3:2004, Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table), 2004.
- [20] European Committee for Standardization (CEN), EN 1015-11:1999, Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar, 1999.
- [21] European Committee for Standardization (CEN), EN 1015-18:2002, Methods of test for mortar for masonry - Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar, 2002.
- [22] Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Especificação E 394, Betão–Determinação da absorção de água por imersão, 1993.
- [23] Instituto Português da Qualidade (IPQ), NP EN 998-1:2013, Especificação de argamassas para alvenarias. Parte 1: Argamassas para rebocos interiores e exteriores, 2013.