

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

SANDRA R. CUNHA<sup>1\*</sup>, PEDRO LEITE<sup>1</sup>, JOSÉ B. AGUIAR<sup>1</sup>, VICTOR M. FERREIRA<sup>2</sup>, ANTÓNIO TADEU<sup>3</sup>

1: Universidade do Minho  
Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal  
sandracunha86@gmail.com, a54929@alunos.uminho.pt, aguiar@civil.uminho.pt

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

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

**Palavras-chave:** Materiais de mudança de fase, Argamassas, Incorporação direta, Características físicas e mecânicas

**Resumo** Hoje em dia são inúmeras as preocupações relacionadas com os elevados consumos energéticos, tais como preocupações ambientais, sociais e económicas. A indústria da construção é um dos sectores líderes no consumo de energia elétrica, assumindo assim um importante papel no estudo e desenvolvimento de soluções para esta problemática. Atualmente existe já o conceito de pobreza energética, que se encontra relacionado com o facto das famílias não possuírem condições ou gastarem mais de 10% do seu orçamento para garantir condições de conforto no interior dos seus edifícios. Sabe-se também, que em Portugal cerca de 29% das famílias se encontram nesta situação, surgindo assim, a necessidade de intervir rapidamente. Os materiais de mudança de fase (PCM) possuem a capacidade de regular a temperatura no interior dos edifícios, através da sua capacidade de armazenamento térmico. Assim, as argamassas ou outros materiais de construção com incorporação de PCM encapsulados tem vindo a ser alvo de interesse e estudo por parte da comunidade científica. No entanto, normalmente este tipo de soluções ainda apresenta um custo bastante elevado. Contudo, a utilização de PCM livre, ou seja, não encapsulado, através da sua incorporação direta em argamassas apresenta custos significativamente mais baixos, tornando-se assim numa solução bastante atrativa e mais competitiva. O principal objetivo deste estudo consistiu na caracterização física e mecânica de argamassas de cimento com incorporação direta de PCM não encapsulado. A caracterização física e mecânica destas argamassas teve por base a determinação da sua trabalhabilidade, densidade, absorção de água por capilaridade, absorção de água por imersão, resistência à flexão e resistência à compressão. Foi possível observar que a incorporação de PCM não encapsulado originou um aumento na razão líquido-ligante das argamassas, assim como uma diminuição da absorção de água das mesmas. Por outro lado, verificou-se que as resistências mecânicas não sofreram alterações significativas com a incorporação de PCM.

## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente, existem grandes preocupações ambientais, sociais e económicas relacionadas com os elevados consumos energéticos. Os consumos energéticos na indústria da construção encontram-se presentes em todas as fases de desenvolvimento de um edifício, ou seja, desde a energia despendida para a extração e produção das matérias-primas, construção do edifício e sobretudo nos custos de utilização e manutenção dos edifícios durante o seu tempo de vida.

No que diz respeito aos custos de utilização, existe já o conceito de pobreza energética, que se encontra relacionado com o fato das famílias não possuírem condições económicas ou gastarem mais de 10% do seu orçamento mensal, para garantir condições de conforto no interior dos seus edifícios. As principais causas da pobreza energética em Portugal encontram-se relacionadas com a baixa qualidade construtiva dos edifícios em termos de isolamento térmico, elevados preços de energia e rendimentos familiares muito reduzidos. Sabe-se também, que em Portugal cerca de 29% das famílias se encontram nesta situação, surgindo assim a necessidade de intervir rapidamente.. Uma vez que, facilmente as famílias abdicam do conforto térmico em detrimento da poupança na fatura energética e conseqüentemente no seu orçamento mensal [1-2]. A luta contra a pobreza energética passa por contrariar e tentar eliminar as suas causas. Nesse sentido, e perante a incapacidade de inverter os preços dos combustíveis fósseis ou os baixos rendimentos das famílias portuguesas, a aposta passa essencialmente na melhoria das condições térmicas dos edifícios. Esta melhoria só pode ser conseguida através de medidas que promovam a eficiência energética dos edifícios e o recurso a fontes energéticas mais baratas e sustentáveis [1].

A utilização de fontes de energia renováveis, tais como a energia solar, constitui uma medida fundamental 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 regular a temperatura no interior dos edifícios através da sua capacidade de armazenar e/ou libertar energia para o ambiente. Sendo que, 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, o material altera novamente de estado, neste caso passando 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 [5]. A imersão consiste em mergulhar os produtos de construção em PCM líquido, de forma a que estes absorvam o material por capilaridade [6]. 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 [5]. 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 último, o encapsulamento é o método mais utilizado, sendo que existem duas principais formas de encapsulamento: microencapsulamento e macroencapsulamento [7]. Contudo, a utilização de PCM microencapsulado acarreta custos mais elevados, devido ao tratamento que o material sofre durante o encapsulamento. Assim, a utilização de um PCM livre, ou seja não encapsulado, através da sua incorporação direta em argamassas torna-se bastante atrativa e competitiva, uma vez que permite desenvolver argamassas com capacidade de regulação térmica a um custo significativamente mais baixo. Deve notar-se que, a utilização de um PCM não encapsulado origina uma diminuição no custo de produção das argamassas, uma vez que é possível adquirir esta matéria-prima a um custo mais reduzido e o processo produtivo das mesmas possui menos etapas de tempos de mistura.

As argamassas ou outros materiais de construção com incorporação de PCM encapsulados tem vindo a ser alvo de interesse e estudo por parte da comunidade científica. 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 [8-10]. A incorporação de microcápsulas de PCM em betão e argamassas também foi alvo de investigação [11-14]. Existem também outros estudos com incorporação de PCM em materiais de construção, como por exemplo painéis de PVC, blocos e tijolos [15-17].

O principal objetivo deste estudo consistiu na caracterização física e mecânica de argamassas de cimento com incorporação direta de PCM livre, ou seja, não encapsulado. O principal desafio deste trabalho consistiu na possibilidade de incorporação de um teor elevado de PCM. A caracterização física e mecânica destas argamassas teve por base a determinação da sua trabalhabilidade, densidade, absorção de água por capilaridade, absorção de água por imersão, 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, 15, 16, 18].

Foram utilizadas duas areias de granulometria distintas designadas de areia A e B. A areia A apresentou um tamanho médio de partícula de 439,9  $\mu\text{m}$  e uma massa volúmica de 2600  $\text{kg}/\text{m}^3$ . A areia B apresentou um tamanho médio de partícula de 757,7  $\mu\text{m}$  e uma massa volúmica de 2600  $\text{kg}/\text{m}^3$ . O superplastificante utilizado é baseado em poliacrilato, com densidade de 1050  $\text{kg}/\text{m}^3$ . O cimento utilizado foi um cimento Portland CEM II B-L 32.5N com uma massa volúmica de 3030  $\text{kg}/\text{m}^3$ . A cinza volante utilizada foi derivada da combustão de carvão na central termoelétrica do Pego em Portugal, com uma massa volúmica de 2420  $\text{kg}/\text{m}^3$ . Finalmente, o PCM utilizado é não-encapsulado, composto por parafina com uma temperatura de transição entre 20-23  $^{\circ}\text{C}$ , entalpia de 200  $\text{kJ}/\text{kg}$ , massa volúmica no estado sólido de 760  $\text{kg}/\text{m}^3$  e massa volúmica no estado líquido de 700  $\text{kg}/\text{m}^3$  [19].

### 2.2. Composições

Foram desenvolvidas 4 formulações distintas com base em diferentes teores de PCM, as quais se apresentam na Tabela 1. O teor de PCM foi fixado em 0%, 5%, 10% e 20% da massa de agregado. O agregado utilizado foi composto por 50% da areia A e 50% da areia B. As composições desenvolvidas foram avaliadas desde o estado fresco até 28 dias de idade. O ligante foi constituído por 54% de cimento e 46% de cinzas volantes.

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

Composição	Cimento	Cinza Volante	Areia A	Areia B	PCM	Superplastificante	Água
CEM-0PCM	162	198	429.8	429.8	0	23.4	104.4
CEM-5PCM	162	198	400.3	400.3	18	2.25	104.4
CEM-10PCM	162	198	397.7	397.7	36	14.4	104.4
CEM-20PCM	162	198	331	331	72	3.6	104.4

### 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, resistência à flexão e resistência à compressão.

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 [20]. O valor resultante do ensaio apenas foi considerado quando compreendido entre  $140 \pm 5$  mm.

O processo de fabrico dos provetes foi efetuado de acordo com norma EN 1015-11 [21]. 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  $22^\circ\text{C}$ ) durante 21 dias.

A absorção de água por capilaridade foi efetuada com base na norma EN 1015-18 [22]. A determinação da absorção de água por imersão foi efetuada com base na especificação do LNEC E 394 [23]. 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 [21]. Para o comportamento em flexão foram utilizados provetes prismáticos com dimensões de  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ . 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

A Figura 1 apresenta a relação de líquido-ligante presente nas diferentes argamassas desenvolvidas. Decidiu-se manter constante a relação de água-ligante em 0.29, contudo o PCM adicionado encontra-se não encapsulado, no estado líquido, de forma a facilitar a sua incorporação nas argamassas, pelo que se torna mais interessante observar a relação de líquido-ligante. Assim, tal como o esperado a incorporação de um maior teor de PCM originou a presença de uma maior relação de líquido-ligante. Sendo que a incorporação de 5% de PCM levou a um acréscimo de 17% na relação líquido-ligante. É importante referir que a utilização de PCM no estado líquido, permite com que este funcione também como um agente para a formação de uma argamassa homogénea, substituindo parte da água de amassadura.

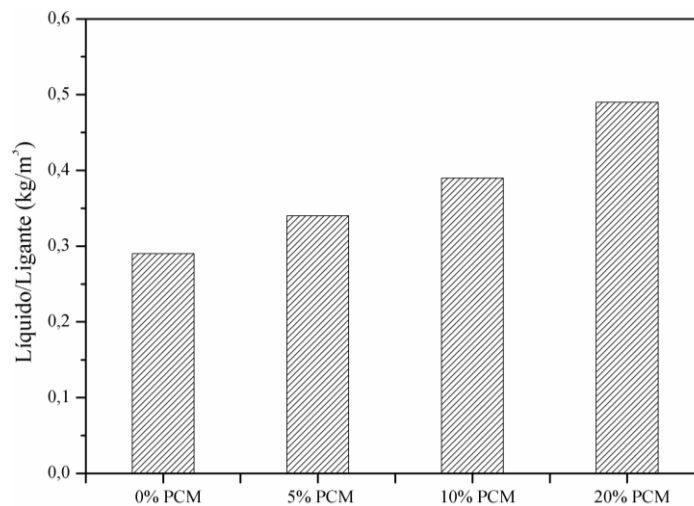


Figura 1. Relação líquido-ligante das argamassas à base de cimento.

### 3.2. Massa volúmica

De acordo com a Figura 2, foi possível observar que a incorporação de PCM não-encapsulado não alterou de forma significativa a massa volúmica das argamassas desenvolvidas, devido à relação água-ligante ter sido mantida constante.

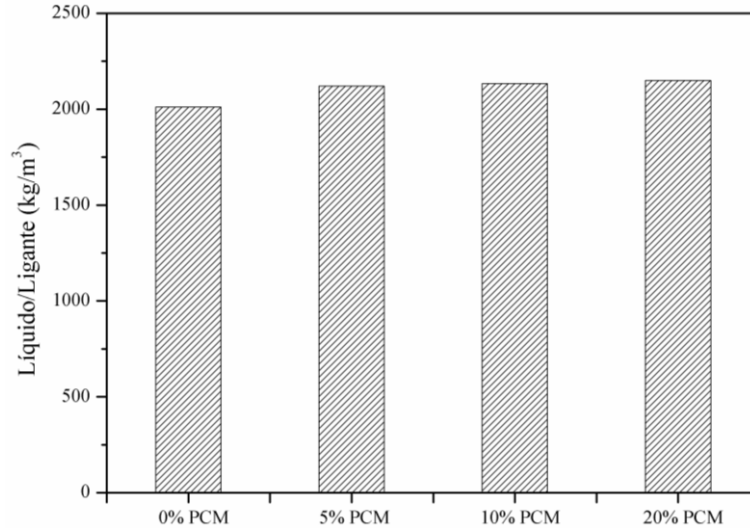


Figura 2. Massa volúmica das argamassas à base de cimento.

### 3.3. Absorção de água por capilaridade

Com base na Figura 3 foi possível verificar que a incorporação de PCM não-encapsulado originou uma diminuição do coeficiente de absorção de água por capilaridade superior a 34%. Este comportamento pode ser explicado pela ocupação total ou parcial dos poros da argamassa pelo PCM.

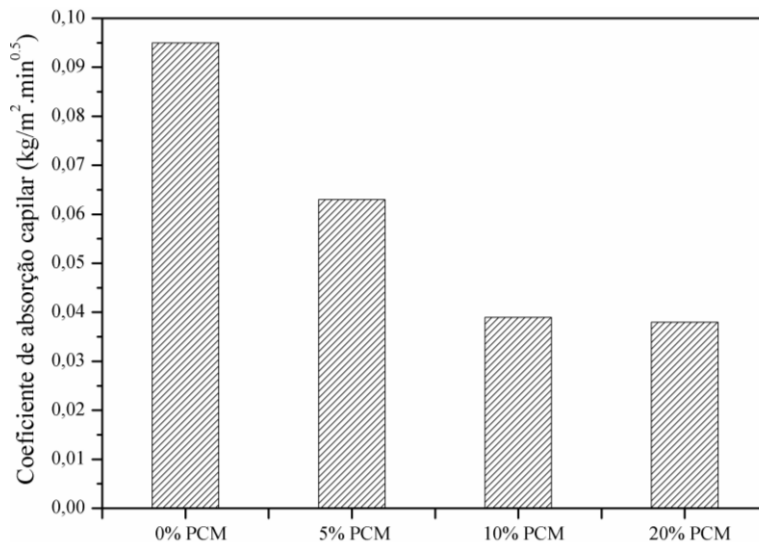


Figura 3. Coeficiente de absorção capilar das argamassas à base de cimento.

A Figura 4 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 uma maior capacidade de absorção de água, devido a uma maior quantidade de poros livres na sua matriz. Foi ainda possível observar uma capacidade de absorção de água menor relacionada com a maior incorporação de PCM.

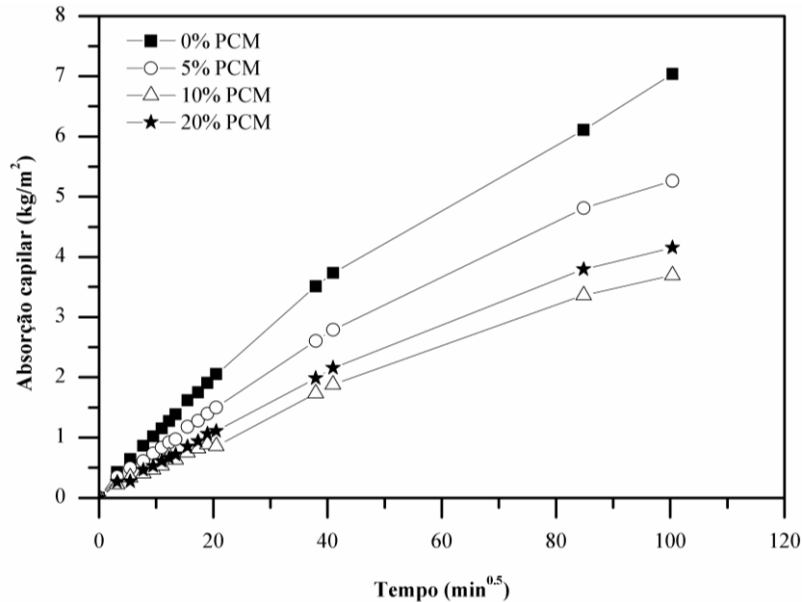


Figura 4. Absorção de água por capilaridade das argamassas à base de cimento.

### 3.4. Absorção de água por imersão

A Figura 5 apresenta a absorção de água por imersão das diferentes argamassas, tendo sido possível observar uma diminuição da absorção de água por imersão com a incorporação de 5% de PCM não-encapsulado de cerca de 15%. Mais uma vez, este comportamento pode ser justificado pela ocupação total ou parcial dos poros da argamassa pelo PCM.

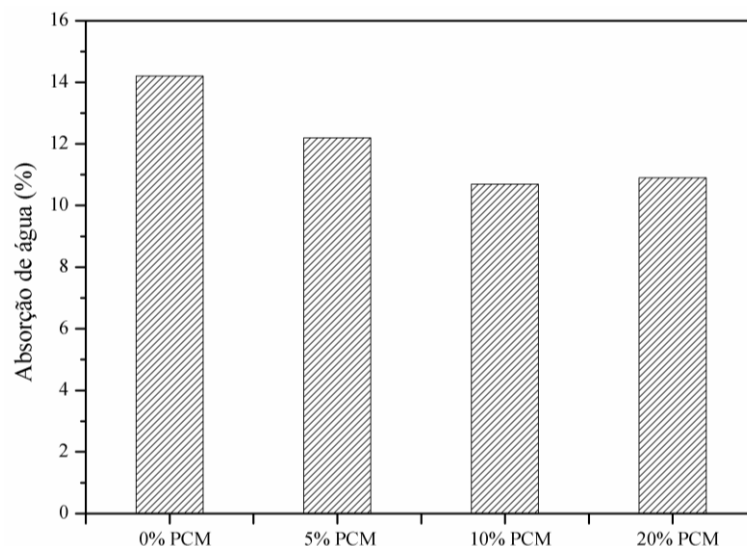


Figura 5. Absorção de água por imersão das argamassas à base de cimento.

### 3.5. Resistência à flexão e compressão

A Figura 6 mostra o comportamento à flexão e compressão das argamassas. Foi possível observar que a incorporação 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.

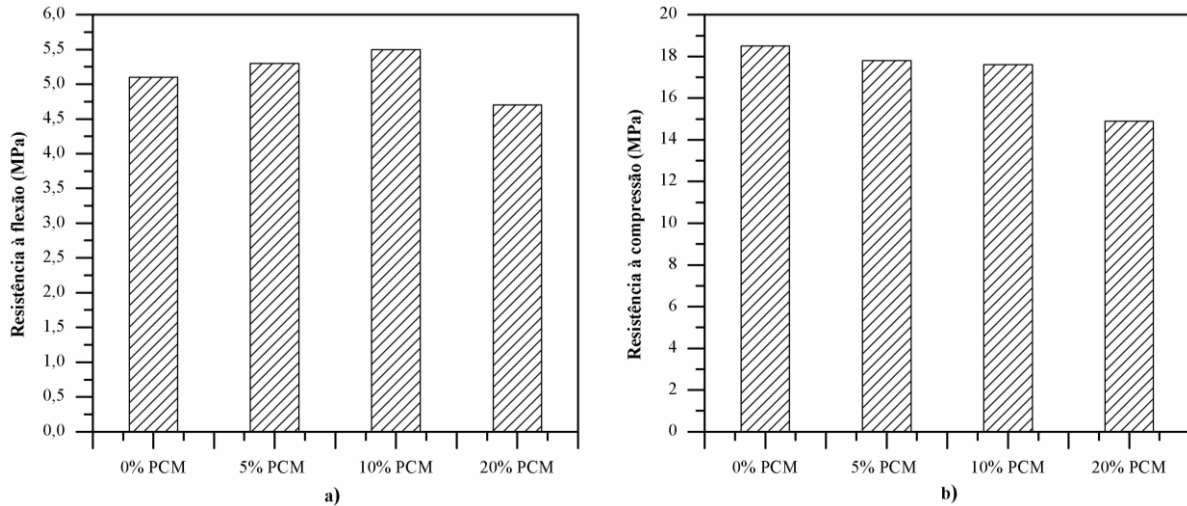


Figura 6. Resistência mecânica das argamassas à base de cimento: a) Comportamento em flexão; b) Comportamento em compressão.

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.

Tabela 2. Classificação das argamassas segundo a especificação NP EN 998-1:2010 [24].

Composição	Resistência à Compressão (MPa)	Classificação NP EN 998-1:2010
CEM-0PCM	18.5	CSIV
CEM-5PCM	17.8	CSIV
CEM-10PCM	17.6	CSIV
CEM-20PCM	14.9	CSIV

## 4. CONCLUSÕES

A realização desta investigação permitiu concluir que é possível a incorporação de material de mudança de fase não-encapsulado em argamassas para revestimento no interior.

No que diz respeito à relação líquido-ligante, foi possível observar que a incorporação de PCM não-encapsulado provoca um aumento na mesma, uma vez que a incorporação do PCM foi realizada no seu estado líquido.

Em relação à absorção de água por capilaridade e imersão, foi possível observar que a incorporação de PCM não encapsulado originou uma diminuição do coeficiente de absorção capilar e da absorção de água por imersão. Este comportamento encontra-se relacionado com a ocupação total ou parcial dos poros da argamassa pelo PCM.

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 seu 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] Edifícios e energia, <http://www.edificioseenergia.pt/pt/a-revista/artigo/pobreza-energetica-cada-vez-mais-perto-das-nossas-casas>, acesso em 18 de Dezembro de 2017.
- [2] Volta ao conhecimento, <http://www.voltaaoconhecimento.pt/single-post/2017/07/31/Previs%C3%A3o-da-Qualidade-do-Ar-PrevQualar-1>, acesso em 18 de Dezembro de 2017.
- [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] 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.
- [6] 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.
- [7] D. Hawes, D. Banu, D. Feldman, "Latent heat storage in concrete", *Solar Energy Materials*, vol. 19, pp. 335–348, 1989.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] K. Darkwa, P. O'Callaghan, D. Tetlow, "Phase-change drywalls in a passive-solar building", *Applied Energy*, vol. 83, pp. 425-435, 2006.
- [12] 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.
- [13] 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.



- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] Rubitherm, RT22HC, <http://www.rubitherm.eu/en/index.php/productcategory/organische-pcm-rt>, accessed: December, 2015.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Especificação E 394, Betão–Determinação da absorção de água por imersão, 1993.
- [24] Instituto Português da Qualidade (IPQ), NP EN 998-1:2013, Especificação de argamassas para alvenarias. Parte 1: Argamassas para rebocos interiores e exteriores, 2013.