



Argamassas de cimento com incorporação direta de Materiais de Mudança de Fase

S. Cunha^{a†}, J. Aguiar^a

^a Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Azurém, P - 4800-058 Guimarães, Portugal

[†] Autor para correspondência: sandracunha@civil.uminho.pt

RESUMO

A eficiência energética dos edifícios é atualmente um dos principais objetivos da política energética a nível nacional e internacional. Os edifícios são um setor líder no consumo de energia, representando cerca de 40% do consumo de energia e emissões de CO₂. A utilização de fontes de energia renováveis, tais como a energia solar, constitui um fator chave na redução da dependência energética dos edifícios. 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 PCM encapsulado têm vindo a ser publicados. No entanto, a utilização de PCM não encapsulado é uma das principais lacunas do conhecimento. É importante notar que a utilização de PCM não encapsulado permite a utilização do material no seu estado puro, reduzindo os impactos ambientais e custo das soluções construtivas. O principal objetivo deste trabalho consistiu no estudo das propriedades físicas e mecânicas de argamassas com incorporação de PCM não-encapsulado, tendo sido possível concluir que a utilização de PCM nesta forma pode ser vista como uma solução económica e funcional para a melhoria da eficiência energética dos edifícios.

1. Introdução

O rápido crescimento económico mundial originou um aumento no consumo de energia. Atualmente, os combustíveis fósseis dominam o mercado mundial de energia, com uma quota de cerca de 81% (Memon, 2014). No entanto, os combustíveis fósseis estão a esgotar-se em todos o mundo e apresentam custos elevados. Por outro lado, a sua exploração e utilização encontra-se relacionada com a emissão de gases nocivos para o ambiente. Assim, a eficiência energética 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 (Soares *et al.*, 2013). Os edifícios são um dos principais setores no consumo de energia em países desenvolvidos. Sendo que, na União Europeia, os edifícios representam 40% no consumo de energia e emissões de CO₂ para a atmosfera (Bilgen, 2014; Cunha *et al.*, 2015).

As soluções baseadas na utilização de energias renováveis contribuem para o aumento da eficiência energética, para a diminuição da utilização das reservas de combustíveis fósseis e emissões de gases poluentes para a atmosfera. A utilização de fontes de energia renováveis, tais como a energia solar, constitui cada vez mais uma medida crucial para promover a eficiência energética e sustentabilidade dos edifícios. Além disso, o recurso a fontes de energias renováveis é um fator chave para a redução da dependência energética dos edifícios. Desta forma, o armazenamento de calor através dos materiais de mudança de fase (PCM) constitui uma estratégia para a obtenção de edifícios de elevado desempenho energético.

Os PCM possuem a capacidade de reduzir as variações de temperatura, devido à sua capacidade de absorção e libertação de energia para o meio ambiente. O princípio de

funcionamento do PCM consiste em alterar o seu estado de acordo com a temperatura ambiente. Os materiais de mudança de fase absorvem e armazenam a energia quando a temperatura ambiente aumenta e o material sofre uma alteração do estado sólido para o estado líquido. Por outro lado, o PCM possui também a capacidade para libertar a energia anteriormente armazenada, quando a temperatura ambiente diminui. Neste caso, o material sofre uma mudança do estado líquido novamente para o estado sólido (Cunha *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2007; Zalba *et al.*, 2003).

O PCM pode ser incorporado em materiais de construção utilizando diferentes métodos, tais como o encapsulamento, estabilização, incorporação direta e absorção por imersão ou capilaridade (Memon, 2014; Cabeza *et al.*, 2011; Tyagi *et al.*, 2011; Fang, Tang & Cao, 2014; Hawes, Banu & Feldman 1989; Hawes & Feldman, 1992; Kaasinen, 1992). A forma mais comum de incorporação é o encapsulamento, existindo dois tipos de encapsulamento: macroencapsulamento e microencapsulamento (Cabeza *et al.*, 2011; Tyagi *et al.*, 2011). Cunha *et al.* 2015, desenvolveram um estudo relativo à incorporação de PCM microencapsulado em argamassas com base em diferentes ligantes. Tendo sido possível concluir que a incorporação destes materiais em argamassas provoca alterações significativas nas suas propriedades no estado fresco e endurecido, tais como um aumento na razão água-ligante e uma diminuição das resistências mecânicas. O PCM estabilizado é preparado através da integração do PCM num material de suporte (polietileno de alta densidade, copolímeros de estireno, resina de poliestireno, etc). No entanto, este processo é complexo (Fang, Tang & Cao, 2014). Relativamente à absorção por imersão, o produto de construção é imerso em um líquido contendo PCM (Tyagi *et al.*, 2011). Hawes *et al.* (1992) estudaram os mecanismos de absorção do PCM em betão de forma a avaliar a quantidade de PCM absorvida e consequente capacidade de armazenamento térmico.

É importante notar que atualmente os custos de produção de PCM encapsulado são bastante altos, cerca de sete vezes superior ao custo de PCM não encapsulado. Assim, torna-se urgente, o desenvolvimento de novos materiais de construção com base em técnicas e matérias-primas com elevado desempenho térmico e baixo custo. Este tipo de solução torna-se extremamente competitiva quando comparada com soluções tradicionais de baixa contribuição para a eficiência energética. Desta forma, torna-se imperativo o desenvolvimento de argamassas de revestimento interior com incorporação de matérias-primas de baixo custo, tais como o PCM não encapsulado, contrariando os custos de produção mais elevados associados à utilização de PCM macroencapsulado ou microencapsulado.

Nos últimos anos vários estudos de materiais de construção com incorporação de PCM encapsulado têm vindo a ser publicados. Estes trabalhos passaram pelo estudo da incorporação de microcápsulas de PCM em placas de gesso (Athienitis *et al.*, 1997; Shilei, Neng & Guohui, 2006; Darkwa, O'Callaghan & Tetlow, 2006; Lai, Chen & Lin, 2010), betão e argamassas à base de diferentes ligantes (Cunha *et al.*, 2015; Entrop, Brouwers & Reinders, 2011; Cunha *et al.*, 2012; Cunha *et al.*, 2013), painéis de PVC, blocos e tijolos (Ahmad *et al.*, 2006; Borreguero *et al.*, 2010; Principi & Fioretti, 2012).

O principal objetivo deste trabalho consistiu no estudo da influência da incorporação de materiais de mudança de fase não encapsulados em argamassas, avaliando as suas propriedades físicas e mecânicas. Outro objetivo foi avaliar o possível deslocamento do PCM não encapsulado na matriz das argamassas. Assim, vários testes foram realizados com quatro composições distintas, sujeitas a três temperaturas ambientes diferentes (10°C, 25°C e 40°C). Foram estudadas argamassas com incorporação de 0%, 2.5%, 5% e 7.5% de PCM não encapsulado. 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, processo de hidratação, resistência à flexão e resistência à compressão.

2. Materiais e métodos

2.1. Materiais

A seleção dos materiais utilizados neste estudo baseou-se em outros trabalhos desenvolvidos pelos autores (Cunha *et al.*, 2013; Cunha *et al.*, 2014; Cunha *et al.*, 2015a, 2015b).

O cimento utilizado foi do tipo CEM II B-L 32.5N com uma densidade de 3030 kg/m³. A

areia utilizada apresentou um tamanho de partícula médio de 439,9 μm e uma massa volúmica real de 2600 kg/m^3 . O superplastificante utilizado é baseado em poliacrilato, com densidade de 1050 kg/m^3 . As fibras utilizadas são fibras sintéticas de poliamida, com um comprimento de 6 mm e densidade de 1380 kg/m^3 (Cunha *et al.*, 2013; Cunha *et al.*, 2014; Cunha *et al.*, 2015a, 2015b). Finalmente, o PCM utilizado é não-encapsulado, composto por uma parafina com temperatura de transição entre 20-23°C, entalpia de 200 kJ/kg, densidade no estado sólido de 760 kg/m^3 e densidade no estado líquido de 700 kg/m^3 (Rubitherm, 2015).

2.2. Composições

Quatro composições foram desenvolvidas com o objetivo de avaliar a possibilidade de incorporação de PCM não-encapsulado em argamassas de revestimento interior. Estas composições foram avaliadas desde o estado fresco até aos 28 dias de idade. As composições estudadas encontram-se na Tabela 1. O teor de PCM foi fixado em 0%, 2.5%, 5% e 7.5% da massa de agregado.

Tabela 1 - Formulação das argamassas (kg/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 experimentais

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, a absorção de água por capilaridade, a absorção de água por imersão, a microestrutura, o processo de hidratação, a resistência à flexão e a resistência à compressão.

A avaliação da densidade, absorção de água por capilaridade, absorção de água por imersão, resistência à flexão e resistência à compressão foi realizada submetendo as argamassas a três temperaturas ambiente diferentes. Assim, os elementos de ensaio foram colocados em fornos ou camaras climáticas nas 24 horas antecedentes à realização dos diversos ensaios. As temperaturas analisadas foram 25°C (temperatura de referência), 10°C e 40°C. Estas temperaturas foram selecionadas tendo em conta a temperatura de transição do PCM. Assim, os testes foram realizados com PCM no estado sólido na matriz da argamassa (10°C), com o PCM no estado de transição (25°C) e com o PCM no estado líquido (40°C). Desta forma, foi possível avaliar não só a influência da adição de PCM não-encapsulado em argamassas, mas também a influência do estado do PCM nas propriedades físicas e mecânicas das argamassas.

Os procedimentos de teste utilizados para caracterizar as propriedades físicas e mecânicas das argamassas desenvolvidas foram baseados em normas europeias e outros trabalhos desenvolvidos pelos autores (Cunha *et al.*, 2014; Cunha *et al.*, 2015a).

A trabalhabilidade foi determinada com base na norma europeia EN 1015-3 (EN 1015-3, 2004), sendo que, o valor resultante apenas foi considerado quando igual a 160 ± 5 mm. Após a preparação, todos os elementos de ensaio foram armazenados durante 7 dias em sacos de polietileno e posteriormente colocados em ambiente de laboratório durante 21 dias, com uma temperatura de cerca de 22°C e 65% de humidade relativa, de acordo com a norma europeia EN 1015-11 (EN 1015-11, 1999).

A observação da microestrutura das argamassas foi realizada com recurso a um microscópio eletrónico de varrimento. Para cada composição, foram preparadas dois elementos de ensaio cilíndricos com diâmetro e altura de aproximadamente 1 cm (Cunha *et al.*, 2014).

Os produtos resultantes da hidratação das argamassas foram avaliados através de ensaios termogravimétricos (DSC-TGA). Os testes foram realizados em atmosfera de árgon, com um fluxo de 100 ml/min e uma taxa de aquecimento de 10 °C/min. Estes ensaios foram realizados

numa gama de temperatura entre 22 °C e 1000 °C. A massa da amostra de ensaio foi de 0.2 g, tendo sido este material removido da superfície de uma amostra de maior dimensão, após 28 dias de idade.

Os ensaios de absorção de água por capilaridade foram realizados com base na norma europeia EN 1015-18 (EN 1015-18, 2002). Por outro lado, os ensaios de absorção de água por imersão foram realizados com base na especificação LNEC E 394 (LNEC E 394, 1993). Os ensaios foram realizados em três temperaturas distintas (10°C, 25°C e 40°C). Os elementos de ensaio foram obtidos por corte, através dos ensaios de flexão de 3 provetes prismáticos com dimensões de 40x40x160 mm³, resultando assim em 6 elementos de ensaio (EN 1015-18, 2002; LNEC E 394, 1993). Relativamente à absorção de água por capilaridade, a quantificação da água absorvida foi efetuada através da realização de pesagens sucessivas, de acordo com um plano estabelecido anteriormente (Cunha *et al.*, 2014; EN 1015-18, 2002). Por sua vez, na absorção de água por imersão, inicialmente os elementos de ensaios foram secos em estufa a uma temperatura de 105°C, até atingirem a massa contante. Posteriormente foram saturados num recipiente com água de consumo a uma temperatura de 20±3°C, até atingirem novamente a massa constante, ou seja uma variação de massa inferior a 0.1% em medições sucessivas intervaladas de 24 horas. Por último foi determinada a sua massa hidrostática após a saturação (Cunha *et al.*, 2014; LNEC E 394, 1993).

O comportamento à flexão e compressão foi determinado com base na norma europeia EN 1015-11 (EN 1015-11, 1999).

Os ensaios foram realizados imediatamente após a exposição dos elementos de ensaio durante 24 horas a três gamas de temperaturas distintas (10 °C, 25 °C e 40 °C). Os ensaios de determinação da resistência à flexão e compressão foram realizados com controlo de força a uma velocidade de 50 N/s e 150 N/s, respetivamente (Cunha *et al.*, 2014; EN 1015-11, 1999).

3. Resultados e discussão

3.1. Trabalhabilidade

Os ensaios de trabalhabilidade foram realizados com o objetivo de verificar a adequação para aplicação das argamassas desenvolvidas (Cunha *et al.*, 2013, 2014, 2015a, 2015b). De acordo com a Figura 1, observou-se uma redução superior a 15% na quantidade de água, com a incorporação de 2.5% de PCM. Relativamente à relação líquido-ligante das argamassas desenvolvidas, foi possível verificar a inexistência de alterações significativas. Este comportamento pode ser justificado pela utilização do PCM, no seu estado líquido, que em parte funciona como agente para a formação de uma pasta homogénea, substituindo parte da água.

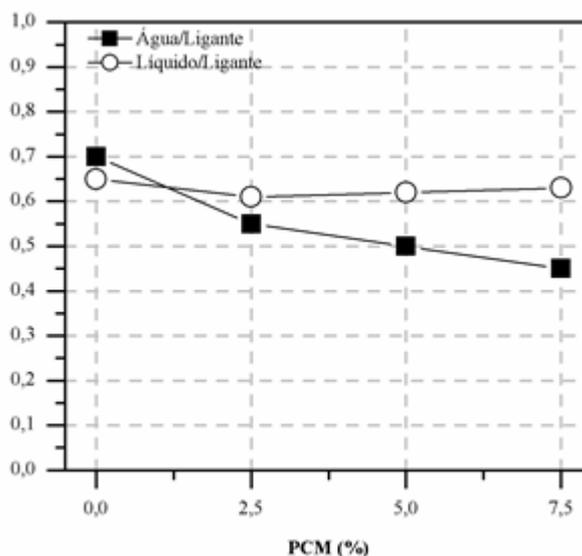


Figura 1 - Relação água/ligante e relação líquido-ligante das argamassas desenvolvidas.

Outros estudos relacionados com a incorporação de microcápsulas de PCM em argamassas revelaram um aumento da quantidade de água adicionada à mistura, o que se encontra relacionado com as reduzidas dimensões do PCM utilizado (Cunha *et al.*, 2013, 2015a, 2015b).

3.2. Densidade

As argamassas testadas em diferentes temperaturas não apresentaram alterações significativas na sua densidade (Figura 2), devido à densidade do PCM no estado líquido e sólido ser bastante semelhante.

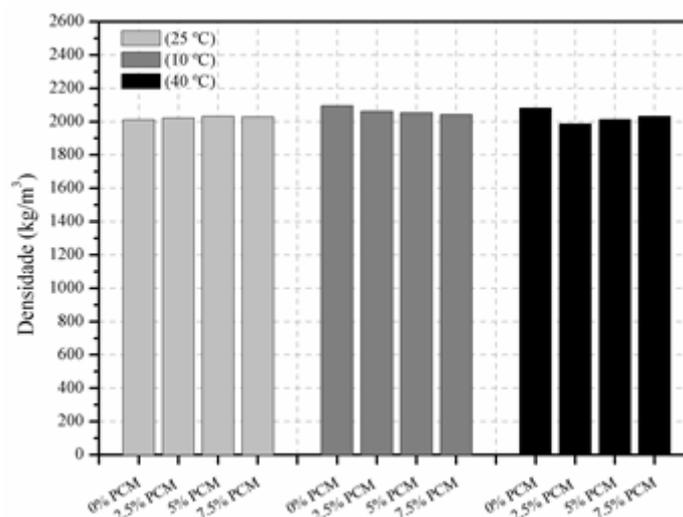


Figura 2 - Densidade das argamassas desenvolvidas a diferentes temperaturas.

3.3. Microestrutura

As observações ao microscópio eletrónico permitiram averiguar a possibilidade da existência de incompatibilidade entre os diferentes materiais constituintes das argamassas. A Figura 3 apresenta a microestrutura de argamassas de cimento com incorporação de diferentes teores de PCM não encapsulado. Estas observações revelaram uma boa interação entre os vários materiais (PCM, fibras, areia e cimento), evidenciando a ausência de fissuras, demonstrando existir um processo de mistura, cura e aplicação das argamassas adequado.

Outras observações foram realizadas com o intuito de avaliar a distribuição dos poros, tendo sido observado que as argamassas com incorporação de PCM apresentam uma diminuição na quantidade de poros e no tamanho dos mesmos (Figura 4). Este comportamento encontra-se relacionado com a diminuição da quantidade de água nas argamassas com adição de PCM não encapsulado.

Os produtos presentes nas argamassas endurecidas foram determinados com base em ensaios de DSC-TGA. De acordo com as Figuras 5 a 8 foi possível observar a presença de um maior número de pontos de inflexão com a incorporação de uma maior quantidade de PCM. Assim, foi possível concluir que a incorporação de PCM não encapsulado originou algumas diferenças nos produtos de hidratação presentes nas argamassas.

De acordo com a Figura 5 foi possível observar a existência de dois picos a uma temperatura de cerca de 80°C e 761°C. O primeiro pico que ocorreu aos 80°C encontra-se relacionado com a perda da água na combinada, que ocorre numa gama de temperatura de 0 a 105°C. A perda da água livre ou quimicamente não combinada ocorre em dois estágios diferentes. O primeiro estágio ocorre entre os 35°C e 70°C, onde a água evapora dos poros de grandes dimensões. O segundo estágio ocorre entre os 70°C e 105°C, em que se verifica a libertação da água retida nos poros capilares (Anjos *et al.*, 2012; Bhatti & Reid, 1985; Alarcon-Ruiz, *et al.*, 2005; Baert *et al.*, 2008). O segundo pico, que ocorreu a uma temperatura de 761°C encontra-se relacionado com a descarbonatação do carbonato de cálcio (CaCO₃) (Anjos *et al.*, 2012; Dollimore *et al.*, 2000). A Figura 6 apresenta os resultados do ensaio de DSC-TGA para uma

argamassa com incorporação de 2.5% de PCM não encapsulado. Foram observados três picos diferentes a uma temperatura de 89°C, 202 °C e 746°C. Como mencionado anteriormente o pico encontrado aos 89°C encontra-se relacionado com a perda da água quimicamente não combinada. O pico verificado a uma temperatura de 746°C diz respeito à descarbonatação do carbonato de cálcio. Por ultimo, o pico relativo aos 202°C encontra-se relacionado com o ponto de ebulição do PCM presente na amostra (Rubitherm, 2015).

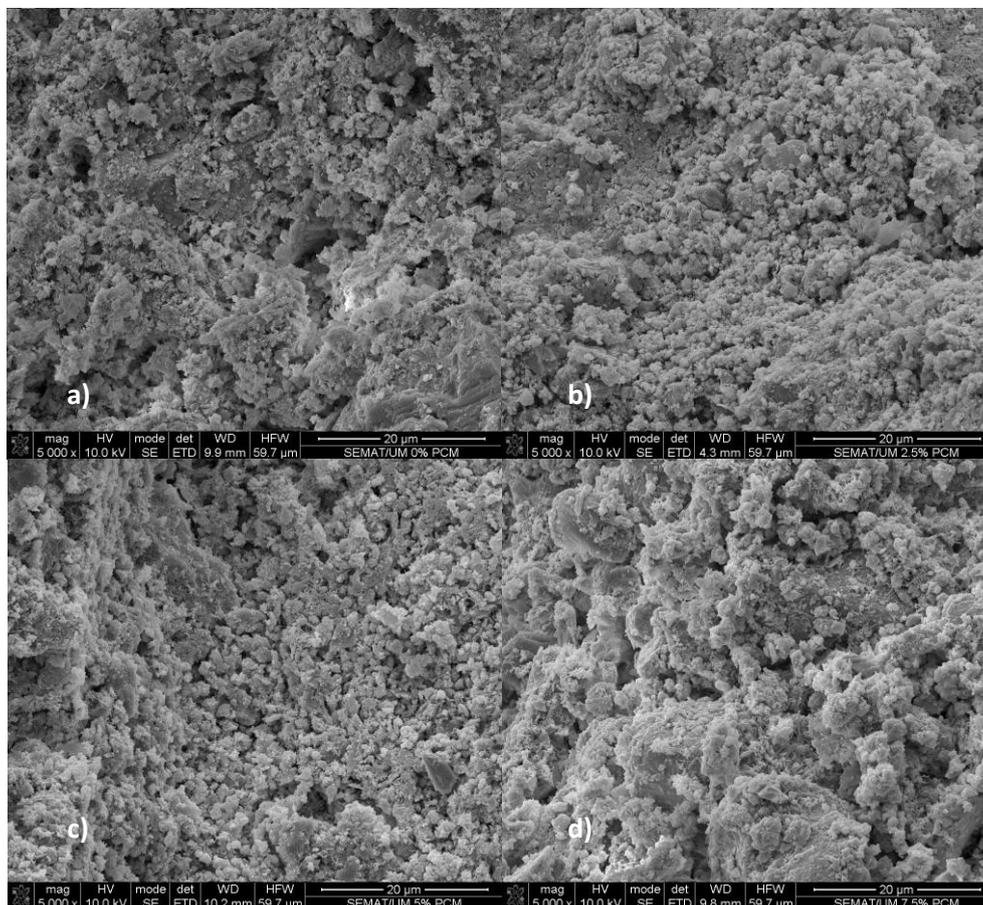


Figura 3 - Observações microscópicas das argamassas desenvolvidas: a) Argamassa de referência (0% PCM); b) Argamassa com incorporação de 2.5% de PCM; c) Argamassa com incorporação de 5% de PCM; d) Argamassa com incorporação de 7.5% de PCM.

A Figura 7 mostra os resultados do ensaio de DSC-TGA de uma argamassa à base de cimento com adição de 5% de PCM não encapsulado. Sendo que, foi possível identificar a existência de 5 picos distintos que ocorreram a diferentes temperaturas (87°C, 210°C, 431°C, 494°C e 750°C). Aos 87°C verificou-se a evaporação da água quimicamente não combinada, aos 210°C foi identificado o ponto de ebulição do PCM e aos 750°C a descarbonatação do carbonato de cálcio. Contudo, dois picos diferentes foram identificados a uma temperatura de 431°C e 494°C. Estes picos encontram-se relacionados com a desidroxilação do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2). A decomposição do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) em óxido de cálcio e água ($\text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$) é caracterizada por uma perda de massa numa gama de temperatura compreendida entre 425°C a 550°C (Anjos *et al.*, 2012). Por último, a Figura 8 apresenta os resultados para uma argamassa com um teor de 7.5% de PCM não encapsulado, na qual também foi possível observar a existência de 5 picos em temperaturas semelhantes às observadas na Figura 8 (99°C, 232°C, 400°C, 467°C e 750°C). Assim, tal como já foi referido anteriormente, o pico verificado a uma temperatura de 99°C corresponde à evaporação da água não combinada, aos 232°C observa-se a evaporação do PCM, aos 400°C e 467°C verifica-se a decomposição do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) e aos 750°C a descarbonatação do carbonato de cálcio (CaCO_3).

Resumidamente, foi possível observar a presença de hidróxido de cálcio em argamassas

com incorporação de 5% e 7.5% de PCM não-encapsulado. A presença de hidróxido de cálcio nestas argamassas indica um atraso no processo de endurecimento das argamassas de cimento. Este comportamento pode ser justificado pela presença do PCM, que pode dificultar o contato do cimento com a água e o ar, retardando assim as reações de hidratação do cimento.

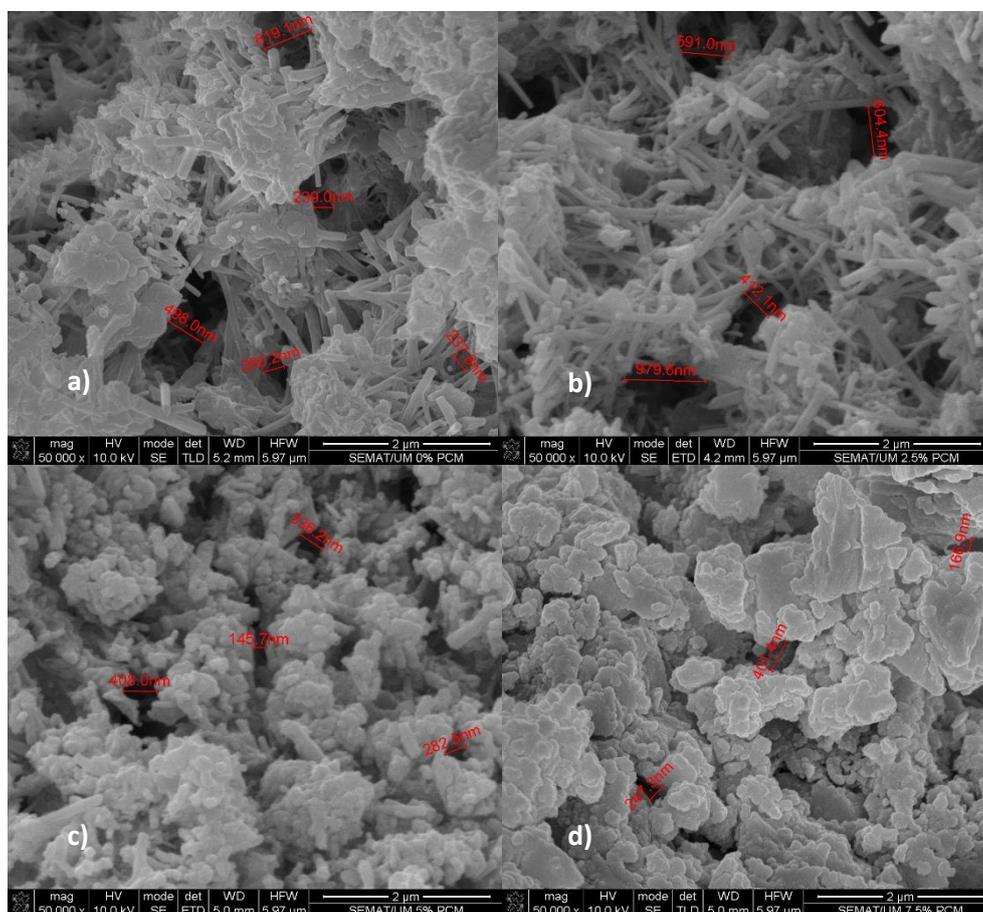


Figura 4 - Distribuição dos poros nas argamassas desenvolvidas: a) Argamassa de referência (0% PCM); b) Argamassa com incorporação de 2.5% de PCM; c) Argamassa com incorporação de 5% de PCM; d) Argamassa com incorporação de 7.5% de PCM.

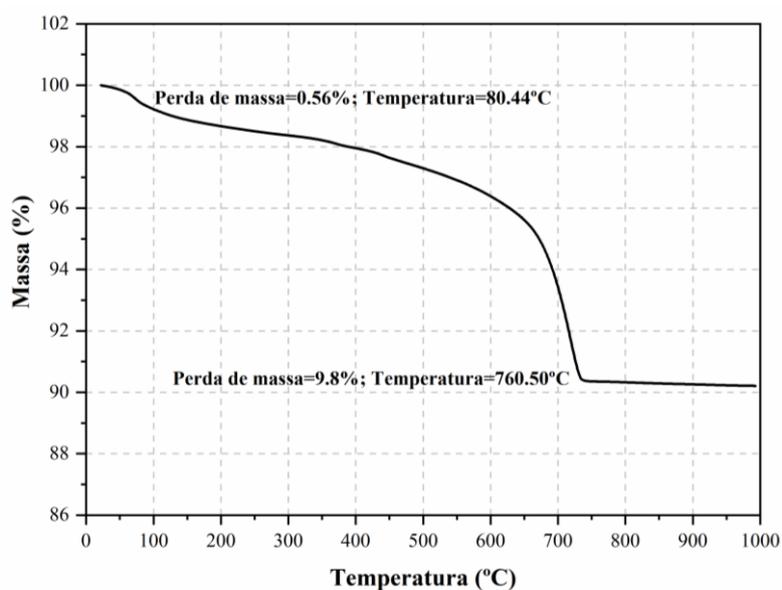


Figura 5 - Ensaio de DSC-TGA – Argamassa de referência (0% PCM).

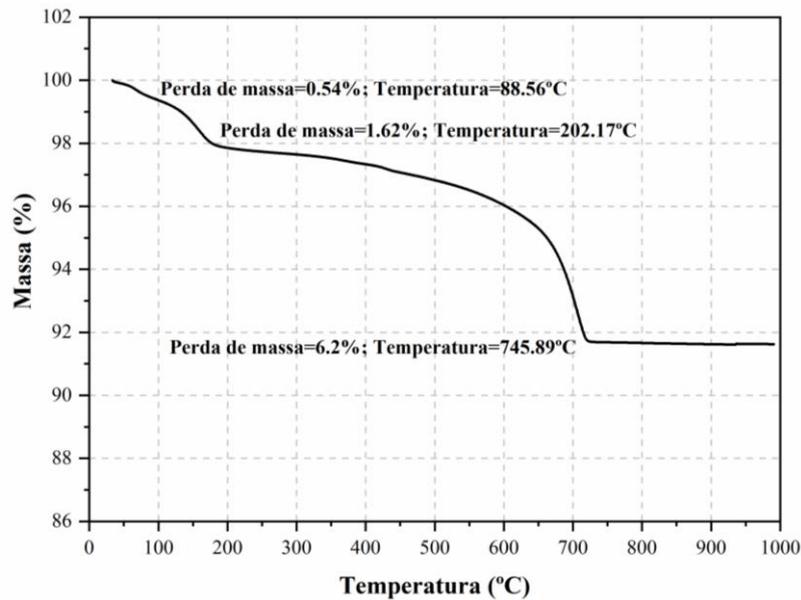


Figura 6 - Ensaio de DSC-TGA – Argamassa de referência (2.5% PCM).

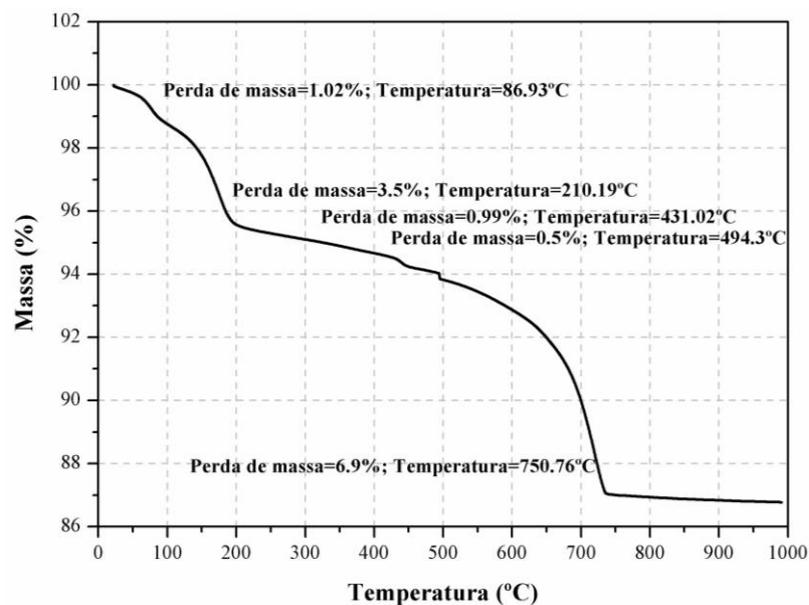


Figura 7 - Ensaio de DSC-TGA – Argamassa de referência (5% PCM).

3.4. Absorção de água por capilaridade

Com base na Figura 9 foi possível verificar que a incorporação de PCM não-encapsulado originou uma diminuição do coeficiente de absorção de água por capilaridade superior a 72%. 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.

A Figura 10 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 consideração 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.

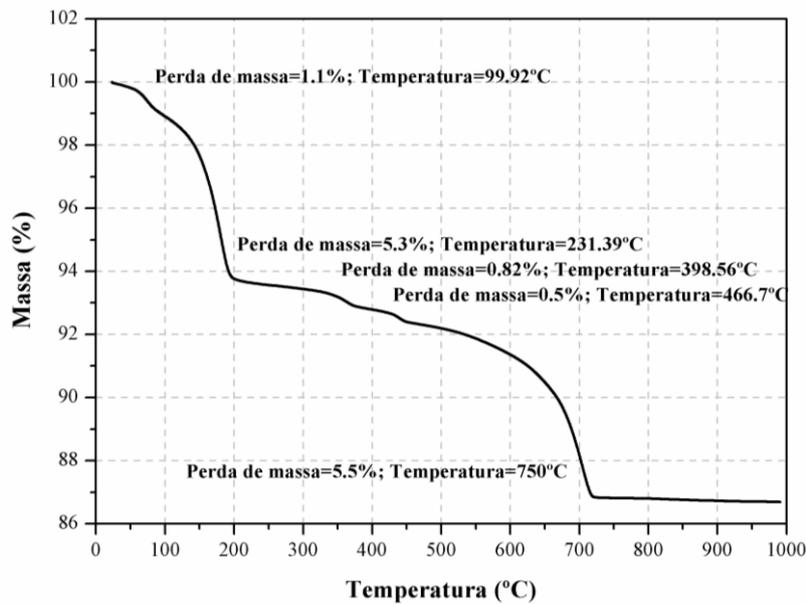


Figura 8 - Ensaio de DSC-TGA – Argamassa de referência (7.5% PCM).

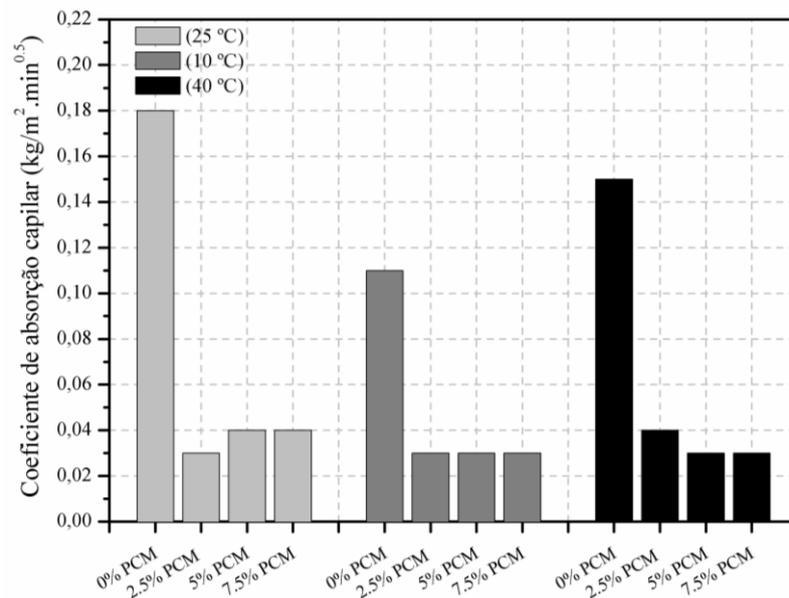


Figura 9 - Coeficiente de absorção de água por capilaridade das argamassas em diferentes gamas de temperaturas.

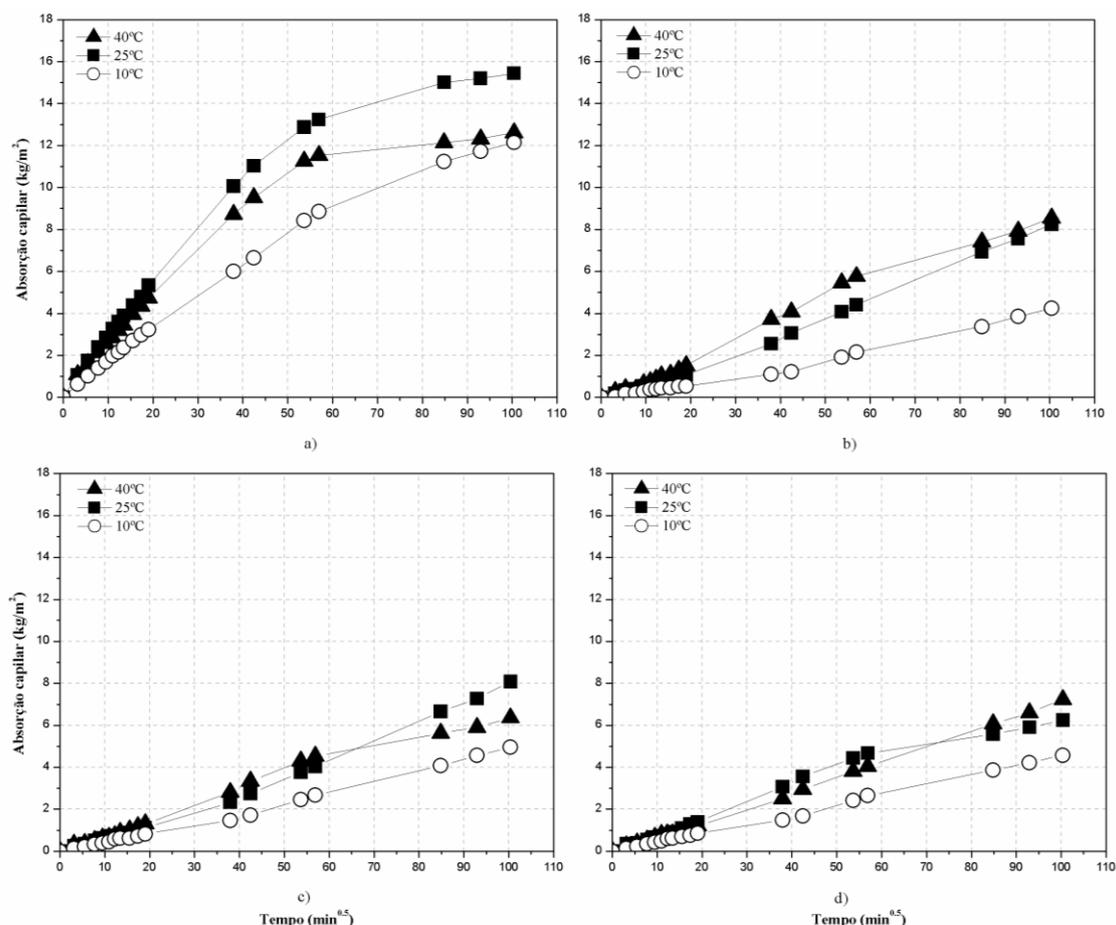


Figura 10 - Absorção de água por capilaridade em diferentes gamas de temperaturas das seguintes argamassas: a) Argamassa de referência (0% PCM); b) Argamassa com incorporação de 2.5% PCM; c) Argamassa com incorporação de 5% PCM; d) Argamassa com incorporação de 7.5% PCM.

3.5. Absorção de água por imersão

A Figura 11 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.

3.6. Comportamento à flexão e compressão

A Figura 12 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 e pela relação líquido/ligante similar em todas as argamassas (Figura 1).

As argamassas foram classificadas de acordo com a norma NP EN 998-1 (Tabela 2) (NP EN 998-1, 2010). Observou-se que as argamassas desenvolvidas apresentaram a classificação máxima prevista na norma (CSIV) (Tabela 3). Assim, é possível obter uma argamassa com incorporação de PCM não encapsulado com um comportamento mecânico apropriado.

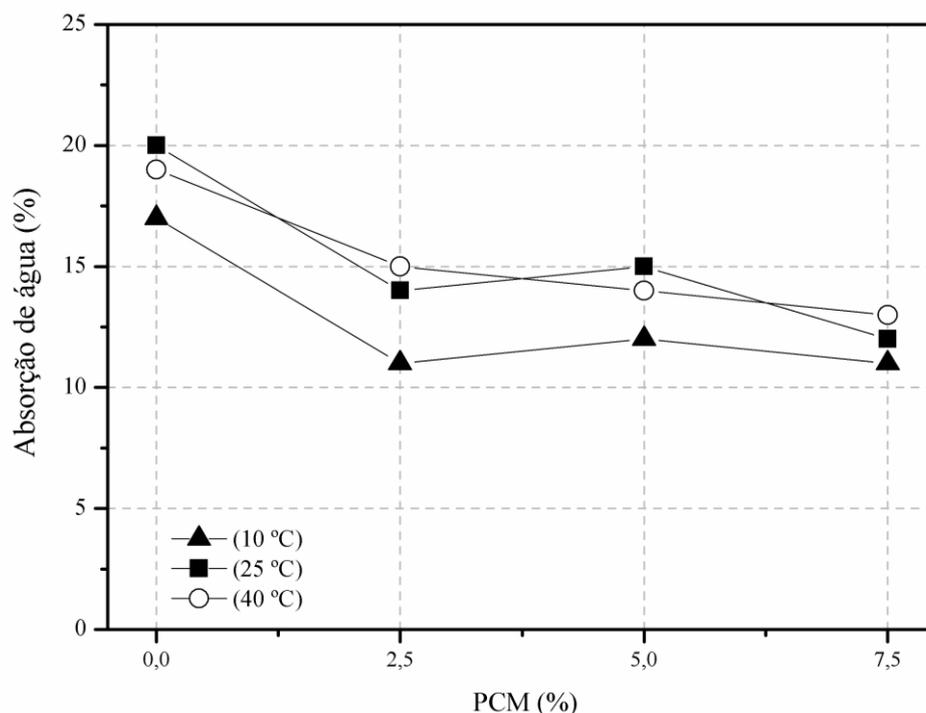


Figura 11 - Absorção de água por imersão.

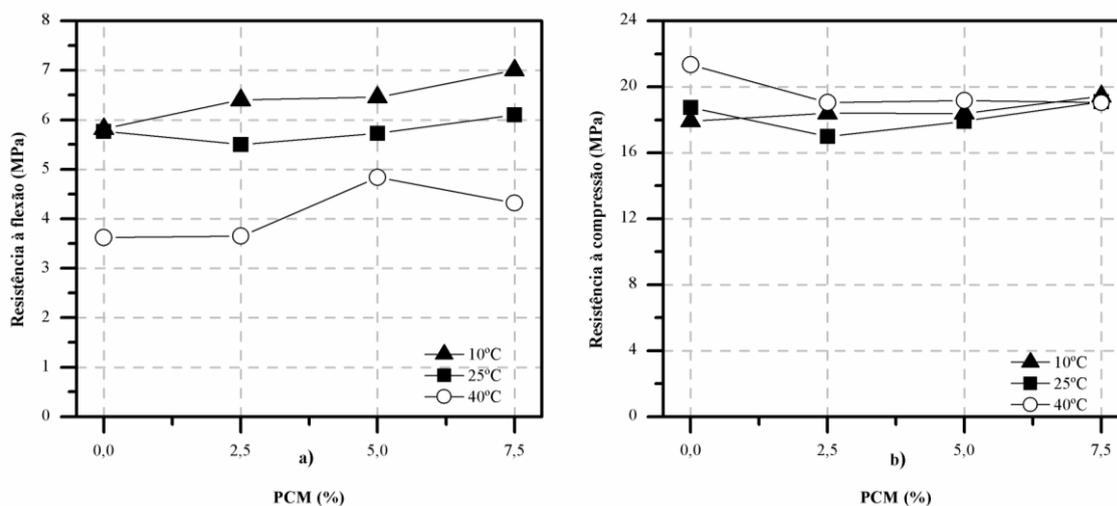


Figura 12 - Resistência à flexão e compressão das argamassas em diferentes gamas de temperaturas.

Tabela 2 - Classificação de acordo com a norma portuguesa NP EN 998-1 (NP EN 998-1, 2010).

Classe de resistência	Resistência à compressão (MPa)
CSI	0.4 a 2.5
CSII	1.5 a 5.0
CSIII	3.5 a 7.5
CSIV	≥ 6.0

Tabela 3 - Classificação das argamassas com base na resistência à compressão.

Composição	Temperatura	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.

Referências

- Ahmad, M., Bontemps, A., Sallée, H., Quenard, D. Thermal Testing and Numerical Simulation of a Prototype Cell Using Light Wallboards Coupling Vacuum Isolation Panels and Phase Change Material. *Energy and Buildings* 38, p. 673-681. 2006.
- Alarcon-Ruiz, L., Platret, G., Massieu, E., Ehrlacher, A. The Use of Thermal Analysis in Assessing the Effect of Temperature on a Cement Paste. *Cement and Concrete Research* 35, p. 609-61. 2005.

- Anjos, M., Camões, A., Jesus, C., Duarte, F. Avaliação da Hidratação de Pastas Cimentícias com Elevados Teores de Adições Minerais. *Engenharia Civil UM* 44, p. 41-58. 2012.
- Athienitis, A. K., Liu, C., Hawes, D., Banu, D., Feldman, D. Investigation of the Thermal Performance of a Passive Solar Test-Room with Wall Latent Heat Storage. *Building and Environment* 32, p. 405-410. 1997.
- Baert, G., Hoste, S., Schutter, G., Belie, N. Reactivity of Fly Ash in Cement Paste Studied by Means of Thermogravimetry and Isothermal Calorimetry. *Journal of Thermal Analysis Calorimetry* 94, p. 485-492. 2008.
- Bhatty, J. I., Reid, K. J. Use of Thermal Analysis in the Hydration Studies of a Type 1 Portland Ce-Ment Produced from Mineral Tailings. *Thermochimica Acta* 91, p. 95-105. 1985.
- Bilgen, S. Structure and Environmental Impact of Global Energy Consumption. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 38, p. 890-902. 2014.
- Borreguero, A. M., Carmona, M., Sanchez, M. L., Valverde, J. L., Rodriguez, J. F. Improvement of the Thermal Behaviour of Gypsum Blocks by the Incorporation of Microcapsules Containing Pcms Obtained by Suspension Polymerization with an Optimal Core/Coating Mass Ratio. *Applied Thermal Engineering* 30, p. 1164-116. 2010.
- Cabeza, L., Castell, A., Barreneche, C., Gracia, A., Fernández, A. Materials Used as PCM in Thermal Energy Storage in Buildings: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, p. 1675-1695. 2011.
- Cunha, S., Aguiar, J. B., Ferreira, V. M., Tadeu, A. Mortars Based in Different Binders with Incorporation of Phase Change Materials: Physical and Mechanical Properties. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 19, p. 1216-1233. 2015b.
- Cunha, S., Aguiar, J., Ferreira, V., Tadeu, A. Influence of Adding Encapsulated Phase Change Materials in Aerial Lime Based Mortars. *Advanced Materials Research* 687, p. 255-261. 2013.
- Cunha, S., Aguiar, J., Ferreira, V., Tadeu, A. Influence of the Type of Phase Change Materials Microcapsules on the Properties of Lime-Gypsum Thermal Mortars. *Advanced Engineering Materials* 16, p. 433-441. 2014.
- Cunha, S., Aguiar, J., Pacheco-Torgal, F. Effect of Temperature on Mortars with Incorporation of Phase Change Materials. *Construction and Building Materials* 98, p. 89-101. 2015a.
- Cunha, S., Alves, V., Aguiar, J., Ferreira, V. Use of Phase Change Materials Microcapsules in Aerial Lime and Gypsum Mortars. *Cement Wapno Beton Special Issue*, p. 17-21. 2012.
- Darkwa, K., O'Callaghan, P., Tetlow, D. Phase-Change Drywalls in a Passive-Solar Building. *Applied Energy* 83, p. 425-435. 2006.
- Dollimore, D., Gupta, J., Lerdkanchanaporn, S., Nippani, S. A Thermal Analysis Study of Recycled Portland Cement Concrete (RPCC) Aggregates. *Thermochimica Acta* 357, p. 31-40. 2000.
- Entrop, A.G., Brouwers, H.J.H., Reinders, A.H.M.E. 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, p. 1007-1020. 2011.
- European Committee for Standardization (CEN). EN 1015-11. Methods of Test for Masonry - Part 11: Determination of Flexural and Compressive Strength of Hardened Mortar. 1999.
- European Committee for Standardization (CEN), EN 1015-18. Methods of Test for Masonry - Part 18: Determination of Water Absorption Coefficient Due to Capillary Action of Hardened Mortar. 2002.
- 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). 2004.
- Fang, G., Tang, F., Cao, L. Preparation, Thermal Properties and Applications of Shape-Stabilized Thermal Energy Storage Materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 40, p. 237-259. 2014.
- Hawes, D. W., Banu, D., Feldman, D. Latent Heat Storage in Concrete. *Solar Energy Materials* 19, p. 335-348. 1989.
- Hawes, D.W., Feldman, D. Absorption of Phase Change Materials in Concrete. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 27, p. 91-101. 1992.
- Instituto Português da Qualidade (IPQ). NP EN 998-1. Especificações de Argamassas para Alvenarias – Parte 1: Argamassas para Rebocos Interiores E Exteriores. 2010.

- Kaasinen, H. The Absorption of Phase Change Substances into Commonly Used Building Materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 27, p. 173-179. 1992.
- Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). Especificação E 394. Betões – Determinação da Absorção de Água por Imersão. 1993.
- Lai, C., Chen, R.H., Lin, C. Heat Transfer and Thermal Storage Behaviour of Gypsum Boards Incorporating Micro-Encapsulated PCM. *Energy and Buildings* 42, p. 1259–1266. 2010.
- Memon, S. A. Phase Change Materials Integrated in Building Walls: A State of the Art Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 31, p. 870–906. 2014.
- Principi, P., Fioretti, R. Thermal Analysis of the Application of PCM and Low Emissivity Coating in Hollow Bricks. *Energy and Buildings* 51, p. 131–142. 2012.
- Rubitherm, RT22HC. Disponível em: <<http://www.rubitherm.eu/en/index.php/productcategory/organische-pcm-r>>. Acesso em: Dez. 2015.
- Shilei, L., Neng, Z., Guohui, F. Impact of Phase Change Wall Room on Indoor Thermal Environment in winter. *Energy and Buildings* 38, p. 18-24. 2006.
- Soares, N., Costa, J., Gaspar, A., Santos, P. Review of Passive PCM Latent Heat Thermal Energy Storage Systems Towards Buildings Energy Efficiency. *Energy and Buildings* 59, p. 82–103 2013.
- Tyagi, V., Kaushik, S., Tyagi, S., Akiyama, T. Development of Phase Change Materials Based Microencapsulated Technology for Buildings: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, p. 1373-1391. 2011.
- Zalba, B., Marín, J., Cabeza, L., Mehling, H. Review on Thermal Energy Storage with Phase Change: Materials, Heat Transfer Analysis and Applications. *Applied Thermal Engineering* 23, p. 251–283. 2003.
- Zhang, Y., Zhou, G., Lin, K., Zhang, K., Di, H. Application of Latent Heat Thermal Energy Storage in Buildings: State-Of-The-Art and Outlook. *Building and Environment* 42, p. 2197–2209. 2007.