

COMPORTAMENTO TÉRMICO DE ARGAMASSAS COM INCORPORAÇÃO DE MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE

Sandra R. Cunha^{1*}, José B. Aguiar¹, Victor Ferreira² e António Tadeu³

1: Departamento de Engenharia Civil
Escola de Engenharia
Universidade do Minho
Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal
e-mail: sandracunha86@gmail.com, aguiar@civil.uminho.pt, web: <http://www.civil.uminho.pt/>

2: Departamento de Engenharia Civil
Universidade de Aveiro
Campus Universitário de Santiago, 3810-193 Aveiro, Portugal
e-mail: victorf@ua.pt, web: <http://www.ua.pt/civil>

3: Departamento de Engenharia Civil
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Universidade de Coimbra
Rua Luís Reis Santos - Pólo II da Universidade, 3030-788 Coimbra, Portugal
e-mail: tadeu@dec.uc.pt, web: <http://www.uc.pt/ftuc/dec>

Palavras-chave: Materiais de Mudança de Fase (PCM), Cimento, Cinzas Volantes, Comportamento térmico, Argamassas.

Resumo. *O aquecimento global é uma questão crítica em todo o mundo, que põe em perigo a vida na Terra. As emissões perigosas, como o dióxido de carbono, são os principais motivadores deste fenómeno negativo. Por outro lado, a energia é um fator essencial para o desenvolvimento económico, social e melhoria da qualidade de vida. O setor de construção possui um enorme contributo nos consumos globais de energia e emissões de gases com efeito estufa, também pelo facto de ser responsável por elevados consumos de recursos naturais e produção de resíduos. Assim, torna-se importante minimizar as missões de dióxido de carbono para a atmosfera, através da reutilização de resíduos e também da diminuição do consumo de energia proveniente de fontes não renováveis. Os materiais de mudança de fase (PCM) possuem a capacidade de regular a temperatura no interior dos edifícios através da sua capacidade de armazenar e libertar energia para o ambiente. Por outro lado, a utilização de cinzas volantes permite diminuir a quantidade de material depositado em aterro e a quantidade de matéria-prima extraída da natureza. Desta forma, a incorporação simultânea de PCM e cinzas volantes em argamassa à base de cimento aparece como uma possível solução, na tentativa de resolver, ou pelo menos minimizar, o consumo energético e a eliminação de parte dos resíduos em aterros, contribuindo para uma melhoria significativa dos parâmetros de conforto no interior de edifícios e do ambiente. O principal objetivo deste trabalho consistiu no estudo do comportamento térmico de argamassas de cimento com incorporação de PCM e cinzas volantes. Foram desenvolvidas doze composições distintas com diferentes teores de PCM e de cinzas volantes, tendo sido possível observar que a utilização simultânea destes materiais aumenta a eficiência energética das argamassas desenvolvidas.*

1. INTRODUÇÃO

O aquecimento global é uma questão crítica em todo o mundo, que põe em perigo a vida na Terra. As emissões perigosas, como o dióxido de carbono (CO_2), são os principais motivadores deste fenómeno climático negativo. Sabe-se, que o setor de construção possui um enorme contributo nos consumos globais de energia e emissões de gases com efeito de estufa. Além disso, espera-se um aumento substancial das necessidades de energia para climatização até 2050. Sendo que, o crescimento estimado nas necessidades de arrefecimento é de cerca de 150% no mundo e cerca de 300% a 600% nos países em desenvolvimento [1].

Por outro lado, o aumento da industrialização e urbanização devido ao crescimento económico e populacional transformou o setor de construção civil num dos sectores que mais consomem recursos naturais, gerando resíduos que afetam negativamente o meio ambiente. Estima-se que a produção anual de cimento seja de aproximadamente 1,6 bilhões de toneladas, o que corresponde a cerca de 7% da carga global de dióxido de carbono na atmosfera [2]. Vários estudos mostram que a utilização de cinzas volantes, em substituição parcial do cimento Portland na produção de betão, contribui para a redução das emissões de CO_2 para a atmosfera [2]. Assim, torna-se importante minimizar o consumo elevado de energia proveniente de fontes não renováveis através da utilização de fontes de energia renováveis, assim como o reaproveitamento e reutilização de resíduos industriais com vista à diminuição da extração de materiais naturais. É de notar que na Europa o sector da construção representa cerca de 50% dos resíduos gerados [3].

Os materiais de mudança de fase possuem a capacidade de regular a temperatura no interior dos edifícios utilizando como recurso apenas a energia solar. Por outro lado, as cinzas volantes são um resíduo industrial, gerado durante a combustão do carvão nas centrais termoelétricas, para a produção de energia. Assim, a incorporação simultânea de PCM e cinzas volantes em argamassa à base de cimento aparece como uma possível solução, na tentativa de resolver, ou pelo menos minimizar, o consumo energético e a eliminação de parte dos resíduos em aterros, contribuindo para uma melhoria significativa dos parâmetros de conforto no interior de edifícios e do ambiente.

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 [4-6]. A incorporação de microcápsulas de PCM em betão e argamassas também foi alvo de investigação [7-10]. Existem também outros estudos com incorporação de PCM em materiais de construção, como por exemplo painéis de PVC, blocos e tijolos [11-13]. Contudo, o estudo e desenvolvimento de argamassas de cimento com incorporação simultânea de PCM e cinzas volantes ainda continua a ser umas das lacunas de conhecimento existentes nesta área. Desta forma, o principal objetivo deste trabalho consistiu no estudo do comportamento térmico de argamassas com incorporação de PCM e cinzas volantes, no clima português, mais especificamente da região norte do país.

2. MATERIAIS, COMPOSIÇÕES E FABRICO

2.1. Materiais

A seleção dos materiais utilizados nesta investigação teve em consideração trabalhos anteriores [10-12]. Desta forma, os materiais utilizados para a formulação das argamassas foram os seguintes: cimento, cinzas volantes, PCM, areia, superplastificante e fibras.

O cimento utilizado é um cimento Portland CEM II B-L 32.5N, com uma massa volúmica de 3030 kg/m^3 . A areia utilizada apresentou um tamanho de partícula médio de $439,9 \mu\text{m}$ 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 cinzas volantes utilizadas são resultantes da combustão de carvão nas centrais termoelétricas, sendo que as utilizadas neste estudo são provenientes da central do Pego, com uma

massa volúmica de 2420 kg/m³. Por último, as fibras utilizadas são fibras sintéticas de poliamida, com um comprimento de 6 mm e densidade de 1380 kg/m³.

As microcápsulas de PCM são constituídas por uma parede em melamina-formaldeído, com temperatura de transição de 24°C, entalpia de 147.9 kJ/kg e distribuição de partícula de 5.8-339 µm, apresentando um tamanho médio de partícula de 43.91 µm.

2.2. Composições

Foram desenvolvidas 12 formulações distintas (Tabela 1). Tendo sido estudadas argamassas de referência, ou seja sem incorporação de PCM e cinzas volantes, argamassas com incorporação de cinzas volantes em três teores distintos (20%, 40% e 60% em substituição da massa de cimento) e ainda argamassas aditivadas com cinzas volantes e material de mudança de fase (40% da massa de agregado).

Com o objetivo de evitar elevados níveis de retração foram ainda incorporadas às argamassas com PCM e cinzas volantes as fibras de poliamida (1% da massa de cimento).

Composição	Cimento	Cinzas Volantes	Areia	PCM	SP	Fibras	Água
C100CV0PCM0	500	0	1418.8	0	15	0	275
C80CV20PCM0	400	100	1396.8	0	15	0	275
C60CV40PCM0	300	200	1401.2	0	15	0	265
C40CV60PCM0	200	300	1366.6	0	15	0	270
C100CV0PCM40	500	0	644.3	257.7	15	0	280
C80CV20PCM40	400	100	646.2	258.5	15	0	270
C60CV40PCM40	300	200	630.3	252.1	15	0	275
C40CV60PCM40	200	300	611.5	244.6	15	0	282.5
C100CV0PCM40F	500	0	622.2	248.88	15	5	295
C80CV20PCM40F	400	100	618.0	247.2	15	4.0	290
C60CV40PCM40F	300	200	602.2	240.9	15	3.0	295
C40CV60PCM40F	200	300	586.3	234.5	15	2.0	300

Tabela 1. Formulação das argamassas (kg/m³).

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 avaliada a microestrutura e comportamento térmico.

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 [14]. O valor resultante do ensaio apenas foi considerado quando compreendido entre 155-165 mm.

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.

O comportamento térmico foi avaliado com recurso a uma câmara climática, programada com uma lei de temperaturas representativa da estação de verão da região norte de Portugal. Os dados climáticos foram obtidos a partir de uma estação meteorológica instalada no campus da Universidade do Minho, em Guimarães, Portugal. Para cada composição foi desenvolvida uma célula de teste em pequena escala, com recurso a um material isolante (placas de poliestireno extrudido) com 3 cm de espessura e revestidas no interior com uma camada de argamassa de 1 cm de espessura. As células de teste de pequena escala possuem uma dimensão de 200×200×200 mm³ (Figura 1). Em cada célula foi colocado

um termopar no seu interior, na zona central, a uma altura de 10 cm da base da célula. Posteriormente, as células de teste foram colocadas dentro de uma câmara climática instrumentalizada com termopares do tipo K, de forma a controlar a temperatura de ensaio. Cada termopar utilizado durante os ensaios térmicos foi conectado com um sistema de aquisição de dados de alta sensibilidade (Agilent 34970A), sendo que o registo da temperatura no interior da câmara climática e das células de teste em escala reduzida foi avaliado a cada minuto.

A estação de verão foi avaliada com base numa gama de temperaturas compreendidas entre os 11°C e 44°C (Figura 2). O estudo compreendeu o desenvolvimento e análise de vários ciclos, sendo cada um composto por 24 horas.



Figura 1. Células de teste utilizadas para avaliação do desempenho térmico das argamassas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Trabalhabilidade

A facilidade de aplicação de uma argamassa no estado fresco está diretamente relacionada à sua trabalhabilidade. A Figura 3 revela que a incorporação de cinzas volantes originou uma ligeira modificação na quantidade de água adicionada às argamassas.

As argamassas de cimento com incorporação simultânea de PCM e fibras apresentaram um leve decréscimo na quantidade de água para 20% de incorporação de cinzas volantes. Esse comportamento pode ser justificado pela forma mais esférica das partículas de cinzas volantes quando comparadas aos demais constituintes das argamassas. No entanto, a adição de maiores quantidades de cinzas volantes provoca um ligeiro aumento no teor de água. Por outro lado, em

relação às argamassas sem incorporação de PCM, verificou-se que a incorporação de 20% de cinzas volantes não causou nenhuma alteração na quantidade de água adicionada à argamassa de cimento. No entanto, houve uma ligeira diminuição na quantidade de água para a incorporação de 40% de cinzas volantes e um ligeiro aumento para a adição de 60% de cinzas volantes.

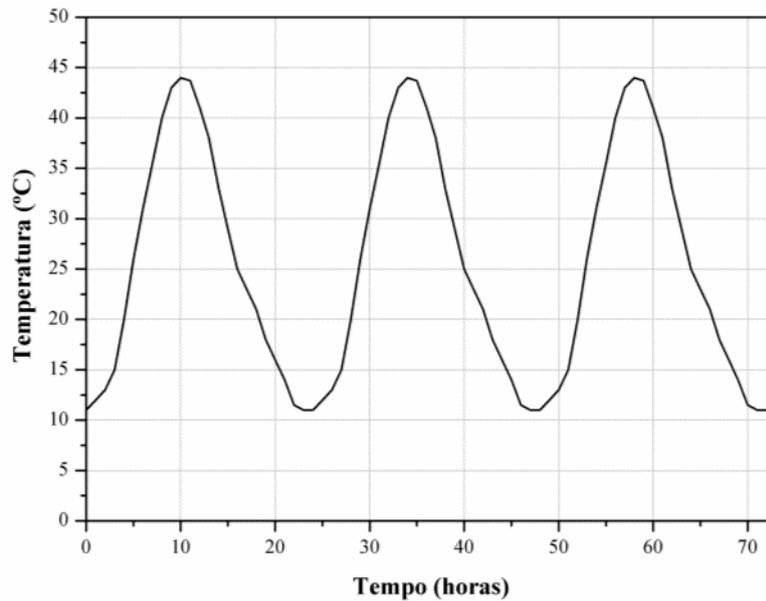


Figura 2. Lei de temperatura utilizada para a avaliação do desempenho térmico das argamassas durante a estação de Verão.

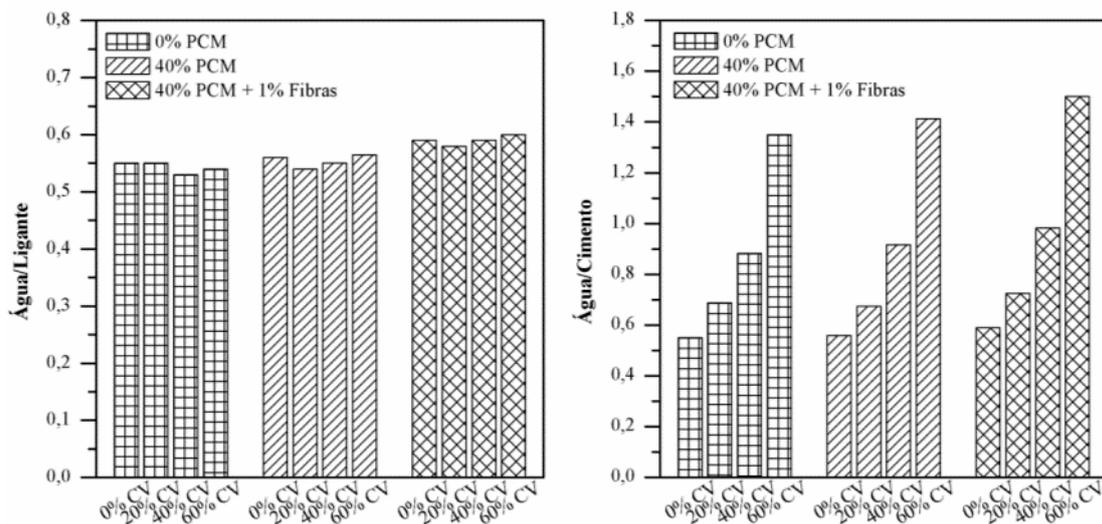


Figura 3. Relação água-ligante e água-cimento das argamassas.

3.2. Microestrutura

A microestrutura foi avaliada com base em observações microscópicas. Foi possível observar uma boa interação entre os diferentes materiais devido à ausência de fissuras na interface de ligação dos mesmos. No que confere à interação entre as cinzas volantes e o cimento pode observar-se uma excelente ligação, uma vez que estes formam uma pasta ligante homogénea. Verificou-se

ainda uma boa distribuição das partículas de PCM o que mais uma vez permite concluir que o processo de fabrico se encontra adequado. Contudo, nas argamassas com incorporação de cinzas volantes foi possível observar a presença de uma menor quantidade de produtos resultantes das reações de hidratação, quando comparados com as argamassas sem incorporação de cinzas volantes. Foi ainda possível observar que a incorporação de cinzas volantes originou uma quantidade superior de poros com dimensões mais pequenas, comparativamente com a argamassa sem incorporação de cinzas volantes (Figura 4). Este comportamento encontra-se relacionado com o atraso das reações de hidratação e pelo aumento da relação água/cimento.

3.3. Comportamento térmico

A Figura 5 apresenta o comportamento térmico das argamassas desenvolvidas durante a estação de verão. Foi possível observar que célula revestida com a argamassa sem incorporação de PCM apresenta maiores temperaturas extremas, comparativamente com as células revestidas com argamassas aditivadas com PCM. Assim, foi possível verificar o efeito benéfico da incorporação de PCM e da incorporação simultânea de PCM e cinzas volantes. Sendo que, o comportamento térmico das células com incorporação de PCM revela temperaturas internas mais estáveis e por um período de tempo mais longo. Este comportamento traduz-se num menor tempo de operação de sistemas de aquecimento e/ou arrefecimento, que permite uma diminuição dos consumos energéticos nos edifícios e consequentemente uma maior poupança no orçamento das famílias e menores impactos para o ambiente, uma vez que o recurso a fontes de energias não renováveis é diminuído.

A Figura 6 apresenta as temperaturas máximas e mínimas registadas no interior das células revestidas com as argamassas em análise. Sendo possível observar que a incorporação de 40% de PCM originou uma diminuição da temperatura máxima de cerca de 5% na situação de arrefecimento e um aumento da temperatura mínima de cerca de 15% na situação de aquecimento. Por outro lado, a incorporação simultânea de PCM e cinzas volantes permite obter uma melhoria do desempenho térmico das argamassas. Sendo que a incorporação simultânea de 40% de PCM e 20% de cinzas volantes origina uma diminuição da temperatura máxima de cerca de 7% e um aumento da temperatura mínima de 20%, comparativamente com a argamassa de referência. Contudo, maiores níveis de incorporação de cinzas volantes, mesmo permitindo a redução das temperaturas extremas, não se revelam tão interessantes comparativamente a uma incorporação de 20% de cinzas volantes. Assim, o melhor desempenho térmico das argamassas com incorporação de PCM e 20% de cinzas volantes encontra-se relacionado com o aumento da microporosidade, evidenciado pela maior quantidade de microporos com menores dimensões.

A realização destes ensaios permitiu ainda a observação do desfasamento temporal das temperaturas extremas (Tabela 2). Tendo sido possível observar que a incorporação de PCM e cinzas volantes permite um aumento do desfasamento temporal, comparativamente com a argamassa de referência (C100CV0PCM). A argamassa com incorporação de PCM e 20% de cinzas volantes foi a que apresentou uma maior influência no desfasamento temporal na situação de aquecimento. A argamassa com incorporação de PCM e 40% de cinzas volantes exibiu um maior desfasamento temporal na situação de arrefecimento. Tal como já foi referido anteriormente, existem sistemas de taxação da energia elétrica diferenciados em função da hora do dia, assim o desfasamento das temperaturas extremas e consequentes consumos elevados para fora das horas de maior procura, conduzem a uma clara vantagem económica.

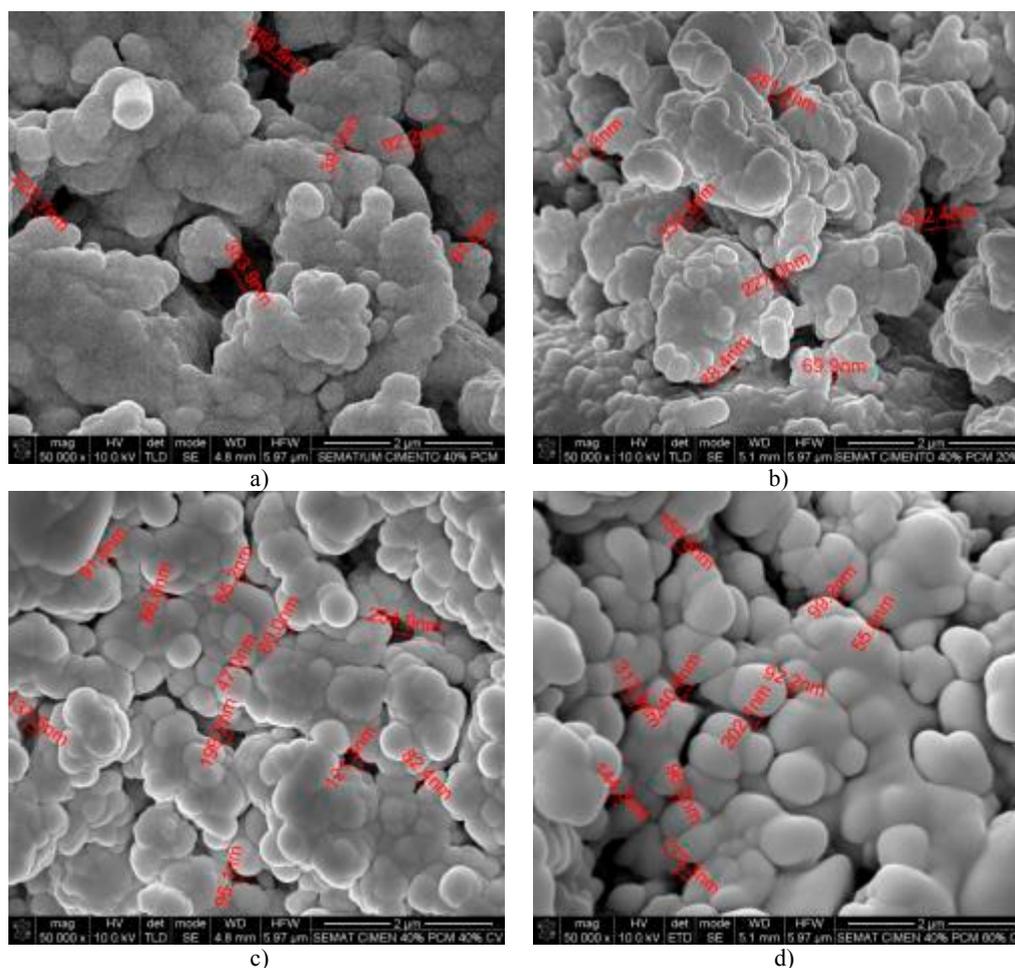


Figura 4. Dimensão e distribuição dos poros nas argamassas com incorporação de 40% PCM e 1% de fibras: a) incorporação de 0% de cinzas volantes (C100CV0PCM40F); b) incorporação de 20% de cinzas volantes (C80CV20PCM40F); c) incorporação de 40% de cinzas volantes (C60CV40PCM40F); d) incorporação de 60% de cinzas volantes (C40CV60PCM40F).

A Tabela 3 apresenta as necessidades de aquecimento e arrefecimento associadas à utilização das diferentes argamassas em estudo. Verificou-se que a incorporação de PCM causou uma diminuição das necessidades de arrefecimento e aquecimento de 14% e 13%, respetivamente. A incorporação de 20% de cinzas volantes causou uma diminuição de 2% e 10% nas necessidades de arrefecimento e aquecimento, respetivamente. Observou-se também que a argamassa de cimento com incorporação de 40% de PCM e 20% de cinzas volantes apresentou o melhor desempenho térmico, mostrando a maior diminuição nas necessidades de arrefecimento e aquecimento, em cerca de 18% e 23%, respetivamente.

Com base nos ensaios de caracterização do comportamento térmico, foi possível observar que, numa situação de verão as argamassas que apresentam um melhor desempenho são as argamassas com incorporação simultânea de 40% de PCM e 20% de cinzas volantes, uma vez que apresentam uma maior redução da temperatura máxima, um maior incremento na temperatura mínima, um maior desfaseamento temporal e menores necessidades de climatização.

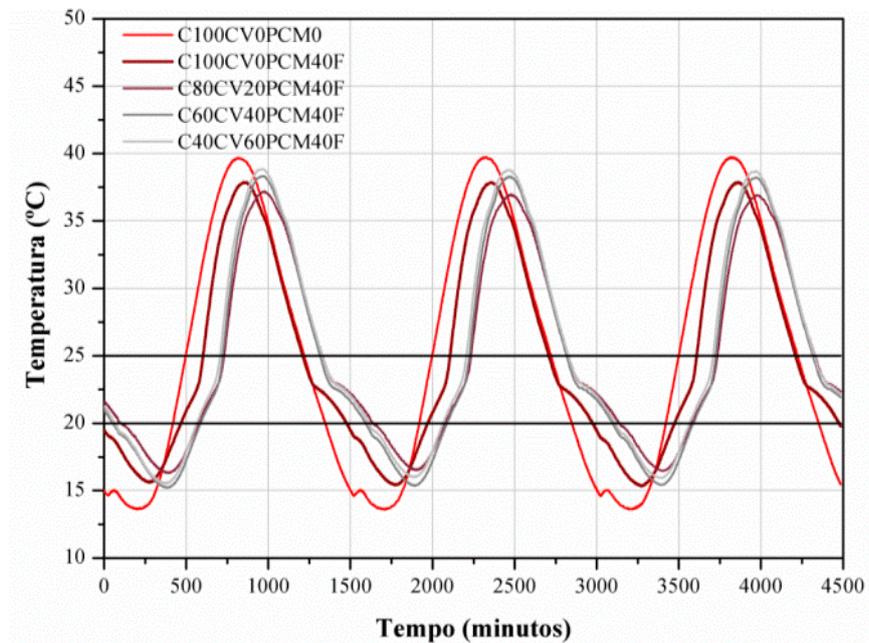


Figura 5. Comportamento térmico na estação de verão das argamassas com incorporação simultânea de PCM e cinzas volantes.

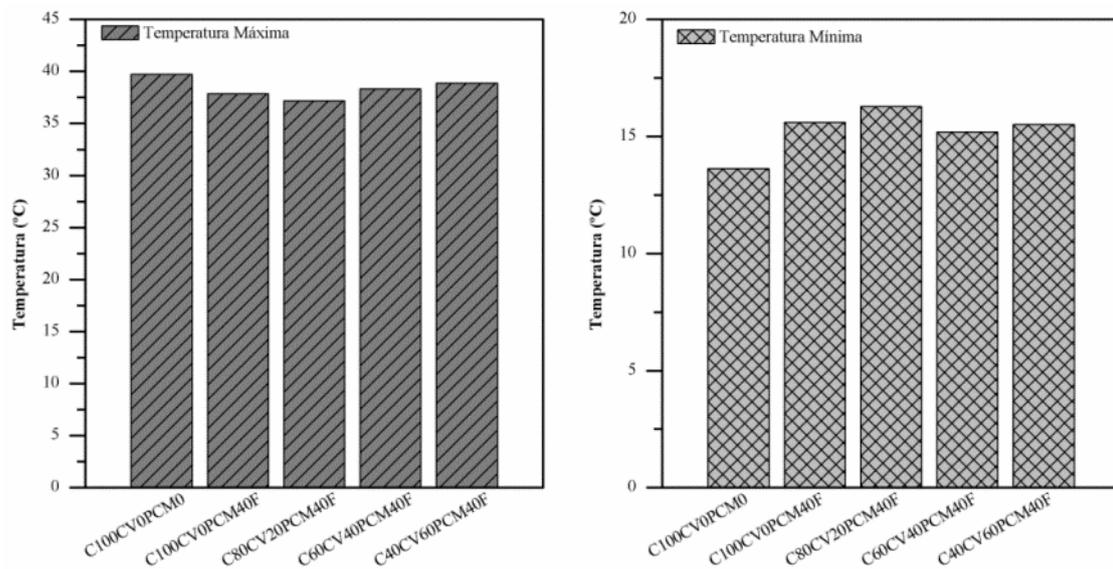


Figura 6. Temperatura máxima e mínima das argamassas com incorporação simultânea de PCM e cinzas volantes.

Composição	Desfasamento temporal (minutos)	
	Temperatura Máxima	Temperatura Mínima
C100CV0PCM0	0	0
C100CV0PCM40F	71	72
C80CV20PCM40F	73	104
C60CV40PCM40F	78	62
C40CV60PCM40F	60	93

Tabela 2. Desfasamento temporal das temperaturas máximas e mínimas durante a estação de verão.

Composição	Necessidades de Aquecimento (J/m^3)	Necessidades de Arrefecimento (J/m^3)	Necessidades de climatização (J/m^3)
C100CV0PCM0	253598	269623	523221
C100CV0PCM40F	218974	226290	445264
C80CV20PCM40F	196425	222218	418643
C60CV40PCM40F	220047	221362	441409
C40CV60PCM40F	200200	231667	431867

Tabela 3. Necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento para a estação de verão.

4. CONCLUSÃO

Este estudo avaliou o comportamento físico e térmico de argamassas de cimento com incorporação simultânea de microcápsulas PCM e cinzas volantes. Verificou-se a possibilidade de incorporação simultânea de resíduos industriais e materiais de mudança de fase em argamassas para revestimento interior.

Os resultados obtidos mostram que a incorporação de PCM em argamassas originou um aumento no teor de água, a fim de obter uma trabalhabilidade adequada, devido às pequenas dimensões das microcápsulas PCM. Por outro lado, a incorporação de 20% de cinzas volantes levou a uma diminuição na quantidade de água adicionada às argamassas, devido às partículas de cinzas volantes possuírem uma forma mais próxima da esférica quando comparadas com as partículas de cimento.

As observações microscópicas mostraram uma boa interação entre todos os constituintes das argamassas, evidenciada pela ausência de fissuras e pela presença de partículas de cimento hidratadas ligadas às microcápsulas PCM. Além disso, a ausência de material aglomerado mostra que o procedimento de mistura utilizado foi apropriado.

De acordo com o comportamento térmico, a utilização de argamassas de cimento com incorporação de PCM mostrou-se uma estratégia eficiente para o desenvolvimento de edifícios sustentáveis, devido à redução de temperaturas extremas e necessidades de climatização. Teoricamente, esperava-se que a substituição do cimento por cinzas volantes não apresentasse nenhuma alteração no comportamento térmico, uma vez que o teor de PCM é mantido. No entanto, as argamassas com incorporação simultânea de PCM e cinzas volantes revelaram um aumento da eficiência energética. Assim, a incorporação simultânea de PCM e cinzas resulta numa maior diminuição do consumo de energia, redução do recurso a combustíveis fósseis e impactos ambientais negativos associados à utilização de sistemas de aquecimento e arrefecimento. A incorporação de um resíduo industrial permite também uma melhoria ambiental, uma vez que reduz a quantidade de material depositado em aterro e reduz a extração de matérias-primas naturais.

Pode-se observar que as argamassas com incorporação de 20% de cinzas volantes e 40% de microcápsulas de PCM (C80FA20PCM40F1) apresentaram melhor desempenho térmico.

REFERÊNCIAS

- [1] M. Saffari, C. Piselli, A. Gracia, A. Pisello, F. Cotana, L. Cabeza, "Thermal stress reduction in cool roof membranes using phase change materials (PCM)", *Energy and Buildings* (2018), vol. 158, pp. 1097-1105. doi: 10.1016/j.enbuild.2017.10.068
- [2] S. Silva, J. Andrade, "Investigation of mechanical properties and carbonation of concretes with construction and demolition waste and fly ash", *Construction and Building Materials* (2017), vol. 153, pp. 704-715. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.143
- [3] M. Behera, S. Bhattacharyya, A. Minocha, R. Deoliya, S. Maiti, "Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete - A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review", *Construction and Building Materials* (2014), vol. 68, pp. 501-516. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.07.003
- [4] G. Fang, F. Tang, L. Cao, "Preparation, thermal properties and applications of shape-stabilized thermal energy storage materials", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (2014), vol. 40, pp. 237-259. doi: 10.1016/j.rser.2014.07.179
- [5] 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* (1997), vol. 32, pp. 405-410. doi: 10.1016/S0360-1323(97)00009-7
- [6] 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.
- [7] K. Darkwa, P. O'Callaghan, D. Tetlow, "Phase-change drywalls in a passive-solar building", *Applied Energy* (2006), vol. 83, pp. 425-435. doi: 10.1016/j.apenergy.2005.05.001
- [8] C. Lai, R.H. Chen, C. Lin, "Heat transfer and thermal storage behaviour of gypsum boards incorporating micro-encapsulated PCM", *Energy and Buildings* (2010), vol. 42, pp. 1259-1266. doi: 10.1016/j.enbuild.2010.02.018
- [9] 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* (2011), vol. 85, pp. 1007-1020. doi:10.1016/j.solener.2011.02.017
- [10] 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* (2012), Special Issue, pp. 17-21.
- [11] 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* (2013), vol. 687, pp. 255-261. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.687.255
- [12] 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* (2015), vol. 19, pp. 1216-1233. doi: 10.1080/19648189.2015.1008651
- [13] 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* (2006), vol. 38, pp. 673-681. doi: 10.1016/j.enbuild.2005.11.002
- [14] 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.