



Painéis cimentícios reforçados com fibra sustentável contendo PCM: Desempenho mecânico e térmico

 B. Y. Pekmezci^{1*} , E. Y. Tuncel² 

 * Autor de Contato: pekmezci1@itu.edu.tr

 DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v10i2.479>

Recepção: 26/11/2019 | Aceitação: 11/02/2020 | Publicação: 30/04/2020

RESUMO

Um estudo experimental foi planejado e executado para a aplicação de PCM (phase change materials) contendo painéis cimentícios reforçados com fibra em edifícios. O objetivo da pesquisa foi melhorar o desempenho térmico dos painéis. Painéis com dimensões de 60x120x2,5 cm foram produzidos e investigações experimentais sobre o desempenho térmico e mecânico dos compósitos foram realizadas. Os compósitos contendo PCM apresentaram maior capacidade de calor latente e menor condutividade térmica. O reforço com fibras cortadas compensou a perda de resistência devido ao PCM em painéis de cimento. A energia de fratura específica dos painéis aumentou com o aumento da taxa de PCM. Os painéis cimentícios reforçados com fibra de PCM mostraram grande potencial para edifícios com eficiência energética, com propriedades térmicas e mecânicas aprimoradas.

Palavras-chave eficiência energética, PCM, compósitos cimentícios reforçados com fibra.

Citar como: Pekmezci, B. Y., Tuncel, E. Y. (2020), “Painéis cimentícios reforçados com fibra sustentável contendo PCM: Desempenho mecânico e térmico”, Revista ALCONPAT, 10 (2), pp. 180 – 190, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v10i2.479>.

¹Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey.

²Department of Architecture, Faculty of Architecture, Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey.

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antiga estrada para Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

É totalmente proibida a reprodução total ou parcial dos conteúdos e imagens da publicação sem autorização prévia do ALCONPAT International A.C.

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no primeiro número do ano 2021, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 2020.

Sustainable fiber reinforced cementitious panels containing PCM: Mechanical and thermal performance

ABSTRACT

An experimental study was planned and executed for the application of Phase Change Materials (PCM) containing fiber-reinforced cementitious panels on buildings. The objective of the research was to enhance the thermal performance of the panels. Panels with the dimensions of 60x120x2.5 cm were produced and experimental investigations about the thermal and the mechanical performance of the composites were carried out. PCM containing composites showed higher latent heat capacity and lower thermal conductivity. Reinforcement with chopped fibers compensated the strength loss due to PCM in cementitious panels. Specific fracture energy of the panels increased with increase of PCM ratio. PCM containing fiber reinforced cementitious panels showed great potential for energy efficient buildings with enhanced thermal and mechanical properties.

Keywords: energy efficiency, phase change materials, fiber reinforced cementitious composites.

Paneles cementosos sostenibles reforzados con fibra que contienen PCM: Rendimiento mecánico y térmico

RESUMEN

Se planificó y ejecutó un estudio experimental para la aplicación de materiales de cambio de fase (PCM) que contienen paneles cementosos reforzados con fibra en edificios. El objetivo de la investigación fue mejorar el rendimiento térmico de los paneles. Se produjeron paneles con unas dimensiones de 60x120x2,5 cm y se llevaron a cabo investigaciones experimentales sobre el rendimiento térmico y mecánico de los compuestos. Los compuestos que contienen PCM mostraron mayor capacidad de calor latente y menor conductividad térmica. El refuerzo con fibras cortadas compensó la pérdida de resistencia debido a PCM en paneles cementosos. La energía de fractura específica de los paneles aumentó con el aumento de la relación PCM. Los paneles cementosos reforzados con fibra que contenían PCM mostraron un gran potencial para edificios energéticamente eficientes con propiedades térmicas y mecánicas mejoradas.

Palabras clave: eficiencia energética, materiales de cambio de fase, compuestos cementosos reforzados con fibra.

1. INTRODUÇÃO

O uso da energia solar tornou-se um método promissor para alcançar soluções eficientes em energia ao longo do século passado. Melhorar as propriedades térmicas dos componentes do edifício contribuirá para o uso eficiente de energia, impedindo ganho / perda de calor através da vedação do edifício. Mais conforto térmico tornou-se importante com o desenvolvimento de sistemas de painéis e vedações finas de construção devido à sua baixa massa térmica. Os PCMs são materiais favoráveis para aplicações térmicas devido à sua grande contribuição para a massa térmica de um edifício e, portanto, fornecem "inércia" contra as alterações de temperatura.

A sustentabilidade se tornou uma meta para o desenvolvimento global e para o uso efetivo de energia confiável, sustentável e moderna. Esse objetivo foi revelado entre os objetivos das Nações Unidas (ONU) 2030 (Nações Unidas, 2015; Essegir e Khouni, 2014).

Por outro lado, o consumo de energia no mundo está aumentando significativamente. Esse aumento no consumo também está causando problemas ambientais. Nas últimas duas décadas, esse aumento chegou a 30% (Sharifi et al., 2017; Chen et al., 2017; Chwieduk et al., 2003; Papadopoulos et al., 2002; IEA, 2016).

Considerando que 60% do consumo de energia é consumido pelos edifícios devido às operações de aquecimento e refrigeração, deve-se considerar que a redução desse consumo contribuirá significativamente para o consumo global de energia. Métodos passivos de ar condicionado podem ser aplicados para reduzir o consumo de energia nos edifícios. Tecnologias passivas de ar condicionado podem ser usadas em conjunto com métodos tradicionais para criar sistemas híbridos (Geetha e Velraj, 2012; Akeiber et al., 2012).

PCMs são materiais com alta capacidade de calor latente. Com os PCMs, é possível armazenar alta quantidade de energia para controlar as alterações de calor no ambiente interno e aumentar o conforto (Mehling e Cabeza, 2008; Souayfane et al., 2016). Quando a temperatura ambiente sobe acima da temperatura de fusão dos PCMs, o PCM realiza uma conversão de fase de sólido para líquido. Durante esta conversão, o calor se acumula a altas temperaturas. Também solidifica quando a temperatura cai abaixo da temperatura de fusão da temperatura ambiente e libera o calor armazenado. Este processo evita altas alterações na temperatura ambiente. Os PCMs permanecem em uma temperatura quase constante durante as mudanças de fase para evitar o superaquecimento e o resfriamento do ambiente (Sharifi et al., 2017; Raoux e Wuttig, 2009).

Com a utilização do PCM em materiais de construção, as cargas de refrigeração e aquecimento dos edifícios podem ser reduzidas. Devido à alta capacidade de armazenamento de calor latente dos PCMs, o que significa um maior armazenamento de calor por unidade de volume do que outros materiais de construção (Sharma et al., 2009), a inércia térmica do edifício que utiliza materiais de construção integrados ao PCM será maior (Singh Rathore et al., 2020). A microencapsulação, que é o processo de envolver as partículas do tamanho de micron de sólidos, líquidos e gases em uma concha inerte, é um dos métodos que pode ser usado para integrar o PCM a outros materiais. Os PCMs microencapsulados têm sido utilizados em muitas pesquisas para melhorar o desempenho térmico dos materiais de construção (Barreneche et al., 2013; Arce et al., 2012; Thiele et al., 2015, Su et al., 2012; Borreguero et al. 2014; Li et al., 2019; Tuncel e Pekmezci, 2018). Embora exista uma conclusão comum sobre o sucesso dos PCMs na melhoria do desempenho térmico, seus efeitos nas propriedades mecânicas dos materiais de construção nos quais estão integrados ainda precisam de um exame mais aprofundado para aplicações confiáveis.

2. ESTUDO EXPERIMENTAL

Neste estudo, experimentos foram realizados para determinar as propriedades mecânicas e térmicas de painéis compostos de cimento contendo PCM. A extrusão por calandras, que é um método de produção sustentável, tem sido usada na produção de painéis. Painéis com teor de PCM de 2,5% e 5% e painéis que não contêm PCM (0%) foram produzidos usando o sistema de extrusão por calandra. A representação esquemática do sistema de produção de painéis de cimento reforçado com fibra de extrusão por calandras é apresentada na Fig. 1.

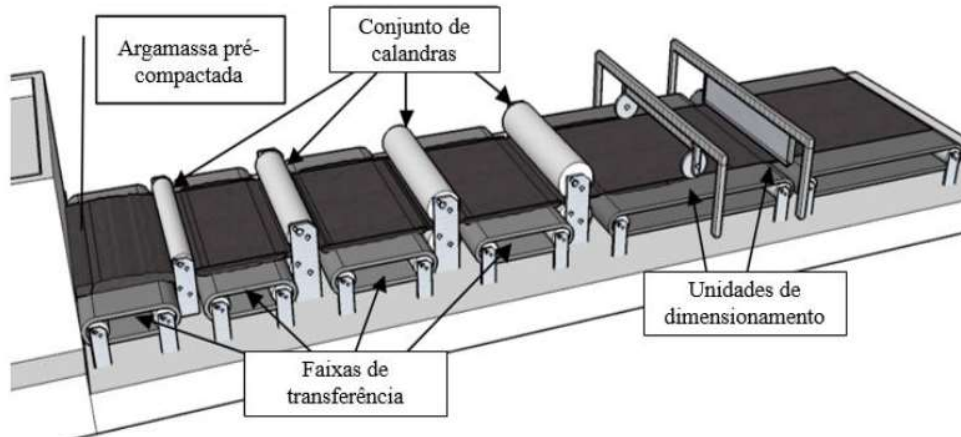


Figura 1. Perspectiva da linha de extrusão por calandras (Pekmezci, 2015).

As dimensões das amostras produzidas foram 60x120x2,5cm. As condições ambientais eram de 18 °C de temperatura e 65% de umidade relativa. As amostras de painel produzidas foram levadas às dimensões necessárias para o estudo experimental e os ensaios foram realizados. Fibras de vidro discretas foram utilizadas na produção de compósitos. Os ensaios foram realizados à temperatura ambiente de 18 °C.

O cimento era cimento branco obtido na fábrica de cimento Cimsa Turquia. Um superplastificante à base de policarboxilato, obtido da SIKA Turkey, foi utilizado para a produção de amostras. As propriedades do cimento branco Cimsa são apresentadas na Tab. 1. Os fios de vidro cortado CEM-FIL Anti-Crak HP 74/12 foram usados como reforço. As propriedades das fibras fornecidas pelo fabricante são apresentadas na Tab. 2. As propriedades do PCM (fornecidas pelo fabricante) são apresentadas na Tab. 3.

Tabela 1. Propriedades do cimento

Propriedade	Valor
Tempo de pega, inicial (minutos)	115
Le chatelier abertura (mm)	1.0
Resistência à compressão, 2 dias, MPa	37.0
Resistência à compressão, 28 dias, MPa	60.0
SO ₃ (%)	3.45
Resíduo insolúvel (%)	0.16
Perda ao fogo (%)	3.10
Cl ⁻ (%)	0.011

Tabela 2. Propriedades da fibra de vidro.

Comprimento da fibra	12 mm
Taxa dimensional (comprimento / diâmetro)	74
Diâmetro do filamento	14 - 19 µm
Perda ao fogo (%) (ISO 1887 : 1995)	0.80 - 2.00
Mistura (%) (ISO 3344 : 1997)	0.50 máx
Massa específica	2.68 g/cm ³
Material	Vidro álcali-resistente
Resistência química	Muito alta
Módulo de elasticidade	72 GPa
Resistência à tração	1700 MPa

Tabela 3. Propriedades do PCM

Tipo de produto	Em pó
Ponto de fusão (aprox. em °C)	23
Capacidade total de armazenamento (aprox. em kJ/kg)	135
Capacidade de calor latente (aprox. em kJ/kg)	100

Na concepção dos painéis compostos, foram utilizadas duas quantidades diferentes de PCM (2,5% e 5,0% da massa total). Uma mistura simples que não incluía PCM também foi produzida para comparação. Em todas as misturas, a proporção de fibras foi utilizada como 2% do volume total. A relação água/cimento foi mantida em 0,40. A trabalhabilidade das misturas, adequada para extrusão por calandras, foi fornecida por superplastificante e modificador de viscosidade. As proporções das misturas utilizadas no estudo são apresentadas na Tab. 4.

Tabela 4. Traços.

Traço #	Cimento kg/m ³	Areia kg/m ³	Relação água/cimento	PCM (% m. total)	Fibra de vidro (% total vol.)	Aditivo WR (% m. cimento)
I	666	1332	0.4	-	2	2
II	617	1234	0.4	2,5	2	2
III	577	1154	0.5	5	2	2

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Condutividade térmica e propriedades mecânicas

Os ensaios de condutividade térmica foram conduzidos de acordo com a ISO 8301: 1991 usando um aparelho de medidor de fluxo de calor (Ahlborn) em compósitos planos e PCM. A Fig. 2 mostra a configuração do ensaio de condutividade térmica. Amostras com dimensões de 350 x 350 x 25 mm foram utilizadas para as medições de condutividade térmica e mantidas em água de cal saturada à temperatura de 21 ± 1 °C por 28 dias. As amostras foram secas a 60 °C até atingirem massa constante para evitar qualquer erro de ensaio à base de umidade. Os ensaios começaram quando a amostra chegou à temperatura ambiente. A determinação da condutividade térmica foi realizada em uma condição de estado estacionário com uma temperatura média de + 10 °C no centro da seção transversal da amostra.



Fig. 2. Configuração do ensaio de condutividade térmica.

A condutividade térmica dos painéis foi de 0,33 W/mK, 0,31 W/mK e 0,29 W/mK para painéis incluindo 0%, 2,5% e 5% de PCM por massa total, respectivamente. Embora a proporção de PCM leve a uma alteração nos valores de condutividade térmica, essa alteração não é significativa quando avaliada do ponto de vista do isolamento térmico.

As propriedades mecânicas dos compósitos foram baseadas no ensaio de resistência à compressão uniaxial de 28 dias e no ensaio de flexão de quatro pontos de viga simples. Ensaio de resistência à compressão foram realizados em amostras de cubo de 40 mm. Para ensaios de flexão, foram utilizadas amostras de vigas de 45 mm de largura e 25 mm de altura. O comprimento da viga era de 350 mm, enquanto o comprimento do vão era de 300 mm. Uma máquina de ensaio de circuito fechado (MTS Criterion 5500) foi usada em ambos os ensaios e as curvas de deflexão de carga foram geradas nos ensaios de flexão. Os valores específicos de energia de fratura (W_f) das amostras também foram determinados de acordo com a recomendação do Comitê Técnico RILEM 50-FMC (RILEM TCS, 1985). Os ensaios foram conduzidos a 18 °C. Cinco amostras individuais foram ensaiadas para cada grupo.

A Fig. 3 mostra os resultados do ensaio de resistência à compressão. Fica claro na Fig. que, à medida que a taxa de PCM aumenta, a resistência à compressão da matriz diminui. Quando a variação dos valores da resistência à compressão com as taxas de PCM da matriz é examinada, a resistência à compressão da matriz diminui 7,5% e 10% quando o PCM é usado em 2,5% e 5%, respectivamente.

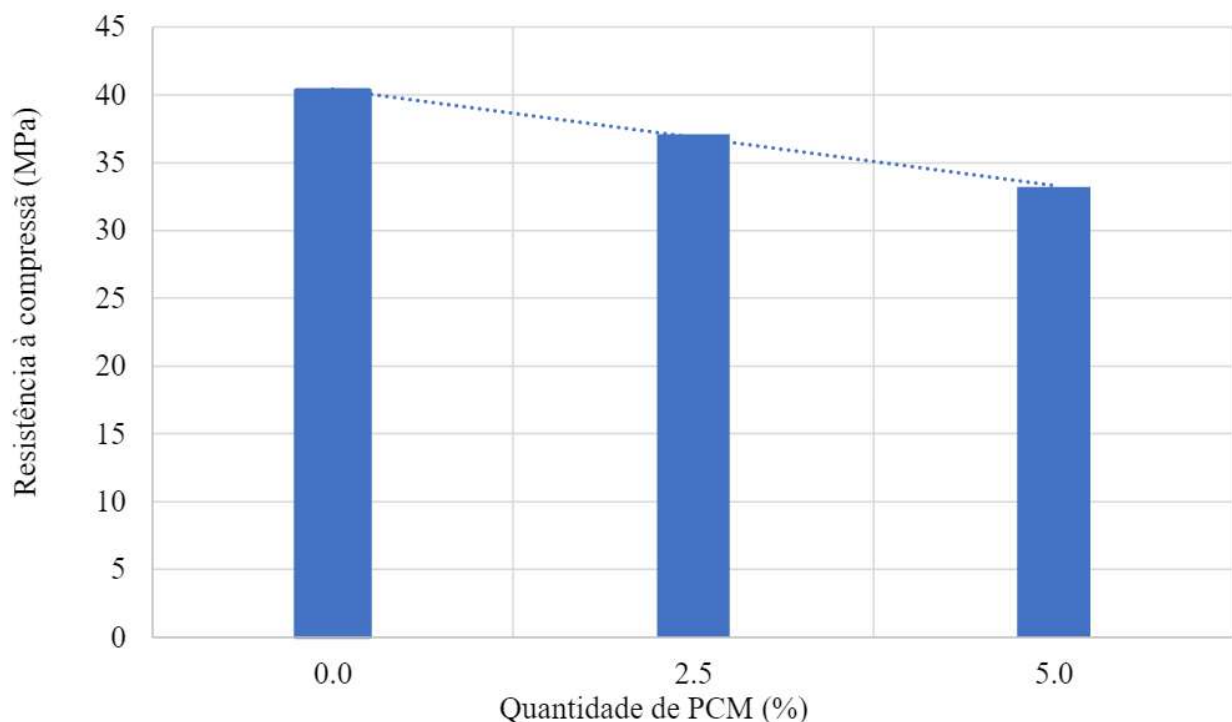


Figura 3. Relação da resistência à compressão com a taxa de PCM dos painéis.

A Fig. 4 mostra a variação dos valores de resistência à flexão com a quantidade de PCM. É claro que as resistências de flexão diminuem à medida que a quantidade de PCM na mistura aumenta. Quando a quantidade de PCM é de 2,5% e 5%, as resistências de flexão diminuem em 7% e 13%, respectivamente.

A Fig. 5 mostra a variação de valores específicos de energia de fratura com a quantidade de PCM. Os valores específicos da energia de fratura aumentam à medida que a quantidade de PCM da mistura aumenta em contraste com os valores de resistência. O aumento específico da energia de

fratura foi de 31% e 40% para taxas de PCM de 2,5 e 5%, respectivamente. Este aumento em valores específicos de energia de fratura pode ser atribuído a um aumento na capacidade de deformação. À medida que a quantidade de PCM na mistura aumenta, a ductilidade dos compósitos também aumenta devido ao valor específico da energia de fratura.

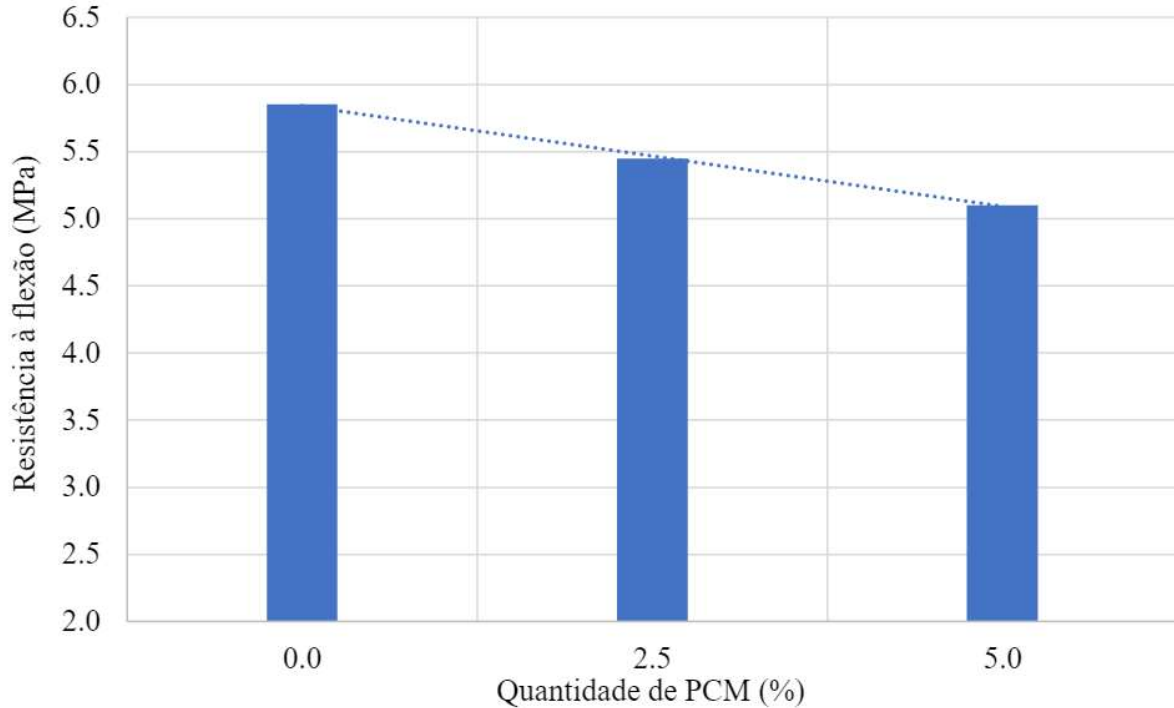


Figura 4. Relação da resistência à flexão com a taxa de PCM dos painéis.

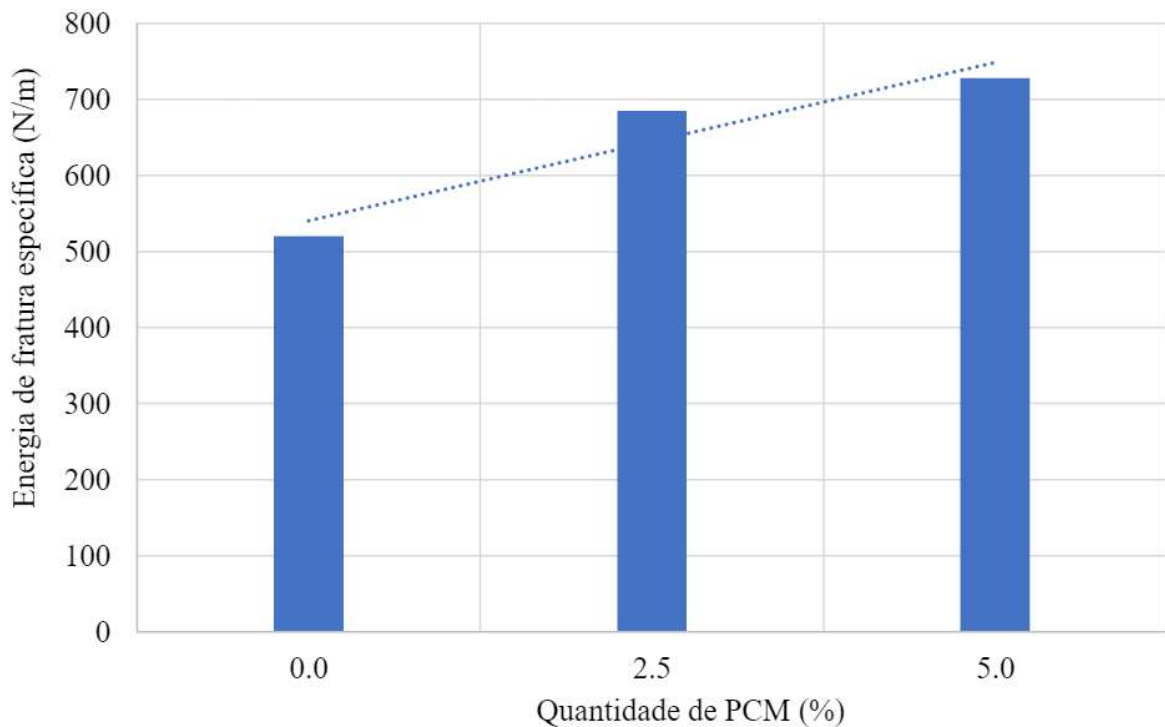


Figura 5. Relação de energia específica de fratura com a taxa de PCM dos painéis.

3.1 Microestrutura

A micrografia do PCM microencapsulado na matriz de cimento é mostrada na Fig. 6. Quando olhamos para a Fig. 6, pode-se dizer que o PCM microencapsulado fornece boa ligação com a matriz de cimento e não há fissuras na interface. No entanto, observa-se que o PCM mantém sua forma esférica. Isso mostra que PCMs microencapsulados durante a mistura, processamento e cura podem ser usados sem deterioração.

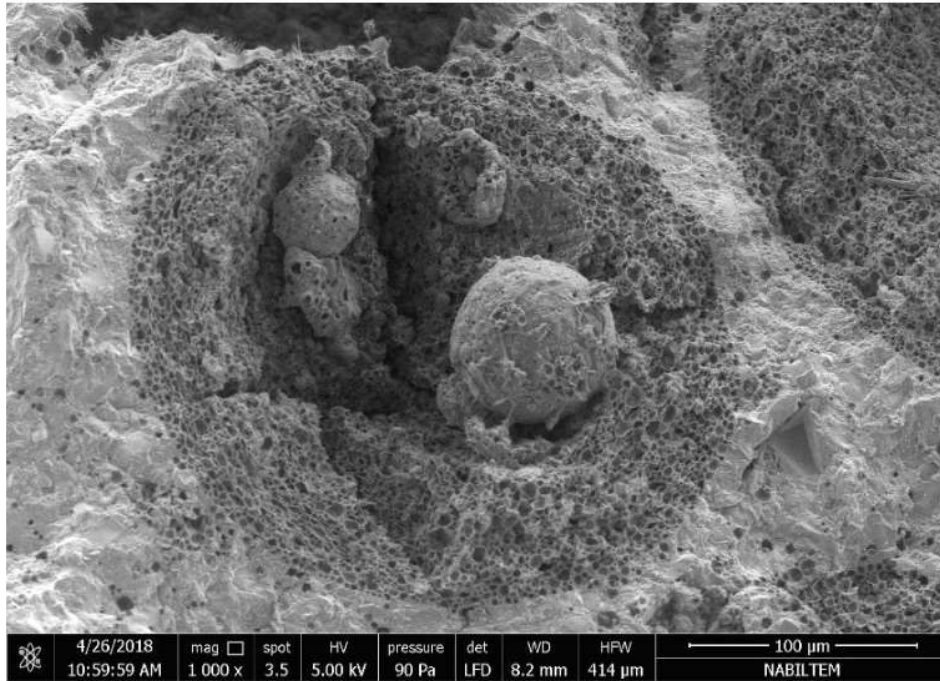
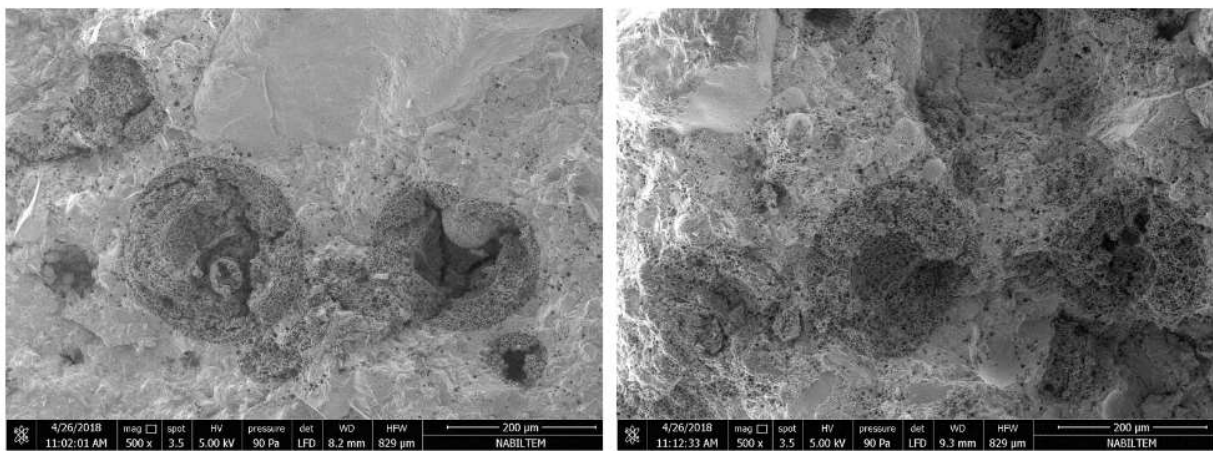


Fig. 6. PCM microencapsulado em matriz de cimento.

Na Fig. 7, a distribuição de PCMs microencapsulados na matriz cimentícia é mostrada no caso de uso de PCM em diferentes proporções.

As Figs. 7a e 7b mostram imagens SEM de misturas contendo 2,5% e 5% de PCM, respectivamente. É claro que os PCM microencapsulados são colocados mais próximos uns dos outros com 5% de uso, mas as cápsulas de PCM não se tocam enquanto preservam a integridade da fase da argamassa entre eles.



(a) 2.5% PCM

(b) 5.0% PCM

Figura 7. Distribuição de PCM microencapsulada na matriz cimentícia

3.2 Desempenho do armazenamento térmico

As paredes internas de duas salas de tamanho equivalente foram cobertas com as amostras produzidas no painel e as mudanças de temperatura nas salas foram monitoradas. Painéis sem PCM foram aplicados a uma das salas, enquanto amostras de painéis contendo PCM contendo 5% foram aplicadas à outra sala. Para obter o melhor desempenho do PCM, foram realizadas medições nas salas equivalentes, com volume de 50 m³ construído no prédio principal do laboratório. O ar condicionado do laboratório principal foi desligado por quatro dias durante as férias e a temperatura no laboratório principal foi deixada flutuar dependendo das condições naturais. Nesse processo, a temperatura máxima no laboratório atingiu 28 °C durante o dia e a temperatura mínima permaneceu em 15 °C durante a noite. A flutuação máxima na sala foi medida como 3 °C na sala onde foram utilizados painéis sem PCM, enquanto 1 °C foi observada na sala onde foram utilizados painéis incluindo PCM.

4. CONCLUSÕES

Dentro do escopo deste estudo experimental, as seguintes conclusões podem ser tiradas;

- Os painéis compostos de cimento, incluindo PCMs, são promissores em termos de propriedades mecânicas. Embora o uso do PCM cause diminuição nos valores de resistência, essa redução não é dramática para impedir o uso dos painéis compostos in situ. Além disso, o uso do PCM ajuda a aumentar os valores específicos de energia de fratura.
- Embora a proporção de PCM utilizada leve a uma alteração nos valores de condutividade térmica, essa alteração não é significativa quando avaliada do ponto de vista do isolamento térmico.
- A flutuação máxima na sala foi medida como 3 °C na sala onde foram utilizados painéis sem PCM, enquanto 1 °C foi observada na sala onde foram utilizados painéis incluindo PCM.

5. REFERÊNCIAS

- Akeiber, H., Nejat, P., Majid, M.Z.A, Wahid, M.A., Jomehzadeh, F., Famileh, I.Z., Calautit, J.K., Hughes, B.R., Zaki, S.A. (2016). *A review on phase change material (PCM) for sustainable passive cooling in building envelopes*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 60:1470–1497. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.036>.
- Arce, P., Castellón, C., Castell, A., Cabeza, L. F. (2012). *Use of microencapsulated PCM in buildings and the effect of adding awnings*. Energy and Buildings. 44: 88–93. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.10.028>.
- Barreneche, C., Navarro, M. E., Fernández, A. I., Cabeza, L. F. (2013). *Improvement of the thermal inertia of building materials incorporating PCM. Evaluation in the macroscale*. Applied Energy. 109: 428–432. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.12.055>.
- Borreguero, A. M., Serrano, A., Garrido, I., Rodríguez, J. F., Carmona, M. (2014). *Polymeric-SiO₂-PCMs for improving the thermal properties of gypsum applied in energy efficient buildings*. Energy Conversion and Management. 87: 138–144. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.07.027>.
- Chen, B., Yang, Q., Li, J. S., Chen, G. Q. (2017). *Decoupling analysis on energy consumption, embodied GHG emissions and economic growth — The case study of Macao*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 67: 662–672. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.027>.
- Chwieduk, D. (2003). *Towards sustainable-energy buildings*. Applied Energy 76 (1–3): 211–217. [https://doi.org/10.1016/S0306-2619\(03\)00059-X](https://doi.org/10.1016/S0306-2619(03)00059-X).

- Esseghir, A.; Khouni, L.H. (2014). *Economic growth, energy consumption and sustainable development: The case of the Union for the Mediterranean countries*. Energy. 71: 218-225. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.04.050>.
- Geetha, N. B.; Velraj, R. (2012). *Passive cooling methods for energy efficient buildings with and without thermal energy storage – A review*. Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research. 29(2): 913-946.
- International Energy Agency, IEA, (2016). *IEA Headline Energy Data*, <https://www.iea.org>, last accessed: 12.02.2017.
- Li, C., Yu, H., Song, Y., Liu, Z. (2019). *Novel hybrid microencapsulated phase change materials incorporated wallboard for year-long year energy storage in buildings*. Energy Conversion and Management. 183: 791–802. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.01.036>.
- Mehling, H.; Cabeza, L.F. (2008), *Heat and Cold Storage with PCM: An up to Date Introduction in to Basics and Applications*, Springer, Berlin, Heidelberg. 308 pp. ISBN: 978-3-540-68556-2, e-ISBN: 978-3-540-68557-9. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-68557-9>.
- Papadopoulos, A. M.; Theodosiou, T. G.; Karatzas, K.D. (2002). *Feasibility of energy savingrenovation measures in urban buildings: the impact of energy prices and the acceptable pay back time criterion*. Energy and Buildings 34(5):455–466. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(01\)00129-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00129-3).
- Pekmezci, B.Y., *Utility of Colloidal Nano-silica in Processing of Fiber Reinforced Cementitious Composites*. Sobolev, K. and Shah S. P. Editors. Nanotechnology in Construction Proceedings of NICOM5, Springer. pp. 501-506. ISBN: 978-3-319-17087-9 eISBN: 978-3-319-17088-6. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-17088-6>
- Raoux, S., Wuttig, M. (Eds.) (2009). *Phase Change Materials: Science and Applications*, Springer, 446 pp. ISBN: 978-0-387-84873-0, e-ISBN: 978-0-387-84874-7. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-84874-7>.
- RILEM TCS, (1985). *Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams*. Materials and Structures, 18(106): 285-290. <https://doi.org/10.1007/BF02472918>.
- Sharifi, N. P., Shaikh, A. A. N., Sakulich, A. R. (2017), *Application of phase change materials in gypsum boards to meet building energy conservation goals*. Energy and Buildings. 138:455–467. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.046>.
- Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., Buddhi, D. (2009). *Review on thermal energy storage with phase change materials and applications*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13(2): 318–345. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.10.005>.
- Singh Rathore, P.K., Shukla, S.K., Gupta, N.K. (2020). *Potential of microencapsulated PCM for energy savings in buildings: A critical review*. Sustainable Cities and Society. 53. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101884>.
- Souayfane, F., Fardoun, F., Biwole, P.H. (2016). *Phase change materials (PCM) for cooling applications in buildings: A review*. Energy and Buildings. 129:396–431. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.04.006>.
- Su, J. F., Wang, X. Y., Wang, S. B., Zhao, Y. H., Huang, Z. (2012). *Fabrication and properties of microencapsulated-paraffin/gypsum-matrix building materials for thermal energy storage*. Energy Conversion and Management. 55: 101–107. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2011.10.015>.
- Thiele, A. M., Jamet, A., Sant, G., Pilon, L. (2015). *Annual energy analysis of concrete containing phase change materials for building envelopes*. Energy Conversion and Management. 103: 374–386. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.06.068>.
- Tuncel, E. Y., Pekmezci, B. Y. (2018). *A sustainable cold bonded lightweight PCM aggregate production: Its effects on concrete properties*. Construction and Building Materials. 181: 199-216. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.269>.

United Nations, (2015), *Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015*, General Assembly A/Res/70/1, Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. Seventieth session, 21 October 2015, pp. 35.
https://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=E
https://www.un.org/en/development/desa/population/migration/generalassembly/docs/globalcompact/A_RES_70_1_E.pdf