

Paneles cementicios sustentables reforzados con fibra que contienen PCM: Comportamiento mecánico y térmico

B. Y. Pekmezci^{1*} , E. Y. Tuncel² 

*Contact author: pekmezci1@itu.edu.tr

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

Recepción: 26/11/2019 | Aceptación: 11/02/2020 | Publicación: 30/04/2020

RESUMEN

Un estudio experimental fue planificado y ejecutado para la aplicación de materiales de cambio de fase (PCM) que contienen paneles cementicios reforzados con fibra en edificios. El objetivo de la investigación fue mejorar el comportamiento térmico de los paneles. Se produjeron paneles con unas dimensiones de 60x120x2,5 cm y se llevaron a cabo investigaciones experimentales sobre el comportamiento 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 cementicios reforzados con fibra que contienen 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 cementicios reforzados con fibra.

Citar como: Pekmezci, B. Y., Tuncel, E. Y. (2020), “*Paneles cementicios sustentables reforzados con fibra que contienen PCM: Comportamiento mecánico y térmico*”, Revista ALCONPAT, 10 (2), pp. 180 – 190, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v10i2.479>.

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

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

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el primer número del año 2021 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 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.

Palavras-chave: energy efficiency, phase change materials, fiber reinforced cementitious composites.

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

RESUMO

Um estudo experimental foi planejado e executado para a aplicação de materiais de mudança de fase (PCM) 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 força devido ao PCM em painéis de cimento. A energia de fratura específica dos painéis aumentou com o aumento da razão 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, materiais de mudança de fase, compósitos cimentícios reforçados com fibra.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de la energía solar se convirtió en un método prometedor para alcanzar soluciones energéticamente eficientes durante el siglo pasado. Mejorar las propiedades térmicas de los componentes de edificios contribuirá al uso eficiente de la energía al evitar la ganancia / pérdida de calor a través de la envolvente del edificio. Más aún el confort térmico se volvió importante con el desarrollo de sistemas de paneles y envolventes delgados para edificios debido a su baja masa térmica. Los materiales de cambio de fase (PCM) son materiales favorables para aplicaciones térmicas debido a su gran contribución a la masa térmica de un edificio y, por lo tanto, proporcionan "inercia" contra las fluctuaciones de temperatura.

La sustentabilidad se ha convertido en una meta para el desarrollo global y para el uso efectivo de energía confiable, sostenible y moderna. Este objetivo se ha revelado entre los objetivos de las Naciones Unidas (ONU) 2030 (United Nations, 2015; Essegir y Khouni, 2014).

Por otro lado, el consumo de energía en el mundo está aumentando significativamente. Este aumento en el consumo también está causando problemas ambientales. En las últimas dos décadas, este aumento ha alcanzado el 30% (Sharifi et al., 2017; Chen et al., 2017; Chwieduk et al., 2003; Papadopoulos et al., 2002; IEA, 2016).

Teniendo en cuenta que el 60% del consumo de energía es consumido por los edificios debido a las operaciones de calefacción y refrigeración, se debe considerar que reducir este consumo contribuirá significativamente al consumo de energía global. Se pueden aplicar métodos pasivos de aire acondicionado para reducir el consumo de energía en los edificios. Las tecnologías de aire acondicionado pasivo se pueden usar junto con los métodos tradicionales para crear sistemas híbridos (Geetha y Velraj, 2012; Akeiber et al., 2012).

Los PCM son materiales con alta capacidad de calor latente. Con los PCM, es posible almacenar una gran cantidad de energía para controlar las fluctuaciones de calor en el ambiente interior y aumentar el comfort (Mehling y Cabeza, 2008; Souayfane et al., 2016). Cuando la temperatura ambiente sube por encima de la temperatura de fusión de los PCM, el PCM realiza una conversión de fase de sólido a líquido. Durante esta conversión, el calor se acumula a altas temperaturas. También se solidifica cuando la temperatura cae por debajo de la temperatura de fusión de la temperatura ambiente y libera el calor almacenado. Este proceso evita altas fluctuaciones en la temperatura ambiente. Los PCM se mantienen a una temperatura casi constante durante los cambios de fase para evitar el sobrecalentamiento y el enfriamiento del medio ambiente (Sharifi et al., 2017; Raoux y Wuttig, 2009).

Con la utilización de PCM en materiales de construcción, se pueden reducir las cargas de refrigeración y calefacción de los edificios. Debido a la alta capacidad de almacenamiento de calor latente de los PCM, lo que significa un mayor almacenamiento de calor por unidad de volumen que otros materiales de construcción (Sharma et al., 2009), la inercia térmica del edificio que utiliza materiales de construcción integrados PCM será mayor (Singh Rathore et al., 2020). La microencapsulación, que es el proceso de encerrar las partículas del tamaño de micras de sólidos, líquidos y gases en una carcasa inerte, es uno de los métodos que se pueden utilizar para integrar PCM en otros materiales. Los PCM microencapsulados se han utilizado en muchas investigaciones para mejorar el rendimiento térmico de los materiales de construcción (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 y Pekmezci, 2018). Aunque hay una conclusión común sobre el éxito de los PCM en la mejora del rendimiento térmico, sus efectos sobre las propiedades mecánicas de los materiales de construcción en los que están integrados aún necesitan una investigación más detallada para aplicaciones confiables.

2. ESTUDIO EXPERIMENTAL

En este estudio, se realizaron experimentos para determinar las propiedades mecánicas y térmicas de los paneles compuestos de cemento que contienen PCM. La extrusión de calandrado, que es un método de producción sostenible, se ha utilizado en la producción de paneles. Los paneles con un contenido de PCM de 2.5% y 5%, y paneles que no contienen PCM (0%), se produjeron en la elaboración usando el sistema de extrusión de calandrado. La figura 1 muestra la representación esquemática del sistema de producción de paneles de cemento reforzado con fibra de extrusión de calandrado.

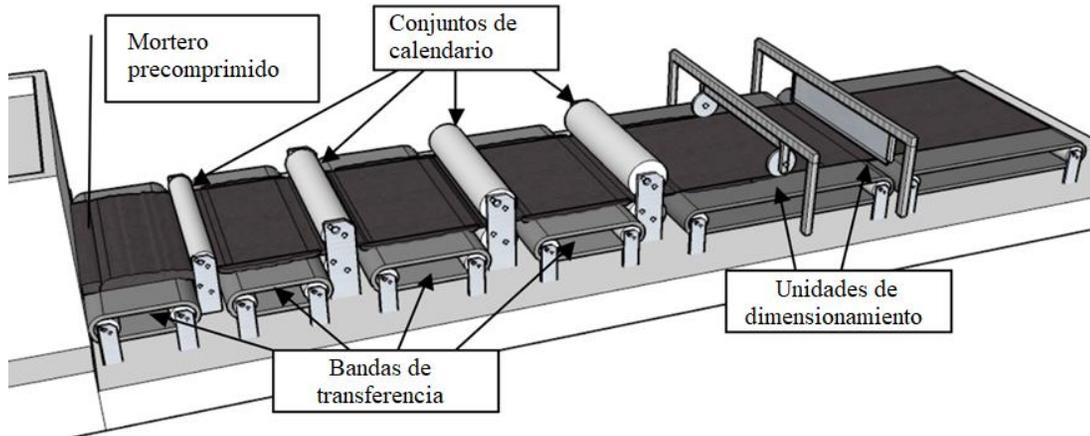


Figura 1. Perspectiva de línea de extrusión del calandrado (Pekmezci, 2015).

Las dimensiones de las muestras producidas fueron 60x120x2,5 cm. Las condiciones ambientales fueron 18 °C de temperatura y 65% de humedad relativa. Las muestras de panel producidas se llevaron a las dimensiones necesarias para el estudio experimental, y se llevaron a cabo pruebas. Se utilizaron fibras de vidrio discretizadas en la producción de materiales compuestos. Las pruebas se llevaron a cabo a 18 °C de temperatura ambiente.

El cemento era cemento blanco obtenido de Cimsa Cement Factory Turkey. Se usó un superplastificante basado en policarboxilato, que se obtuvo de SIKA Turquía, para la producción de muestras. Las propiedades del cemento blanco Cimsa se dan en la Tabla 1. Como refuerzo se utilizaron hebras de vidrio picado CEM-FIL Anti-Crak HP 74/12. Las propiedades de las fibras proporcionadas por el fabricante se presentan en la Tabla 2. Las propiedades de PCM (proporcionadas por el fabricante) se presentan en la Tabla 3.

Table 1. Propiedades del cemento

| Propiedad | Valor |
|---|-------|
| Tiempo de fraguado, inicial (minuto) | 115 |
| Le chatelier apertura (mm) | 1.0 |
| Resistencia a la compresión, 2 días, MPa | 37.0 |
| Resistencia a la compresión, 28 días, MPa | 60.0 |
| SO ₃ (%) | 3.45 |
| Residuos insolubles (%) | 0.16 |
| Pérdida por ignición (%) | 3.10 |
| Cl ⁻ (%) | 0.011 |

Tabla 2. Propiedades de la fibra de vidrio.

| | |
|---|--------------------------|
| Longitud de fibra | 12 mm |
| Relación de aspecto (longitud / diámetro) | 74 |
| Diámetro del filamento | 14 - 19 μm |
| Pérdida por ignición (%) (ISO 1887: 1995) | 0.80 - 2.00 |
| Humedad (%) (ISO 3344: 1997) | 0.50 máx |
| Gravedad específica | 2.68 g/cm ³ |
| Material de vidrio | resistente a los álcalis |
| Resistencia química | muy alta |
| Módulo de elasticidad | 72 GPa |
| Resistencia a la tracción | 1700 MPa |

Tabla 3. Propiedades de PCM

| Tipo de producto | Polvo |
|---|-------|
| Punto de fusión (aprox. En ° C) | 23 |
| Capacidad total de almacenamiento (aprox. En kJ / kg) | 135 |
| Capacidad de calor latente (aprox. En kJ / kg) | 100 |

En el diseño de los paneles compuestos, se utilizaron dos cantidades diferentes de PCM (2.5% y 5.0% de la masa total). También se produjo una comparación simple que no incluía PCM. En todas las mezclas, la proporción de fibra que se utilizó fue del 2% del volumen total. La relación agua / cemento se mantiene como 0.40. La trabajabilidad de las mezclas, que es adecuada para la extrusión de calandrado, es proporcionada por el superplastificante y el modificador de la viscosidad. Las proporciones de mezcla utilizadas en el estudio se dan en la Tabla 4.

Tabla 4. Proporciones de mezclas..

| Mezcla # | Cemento kg/m ³ | Arena kg/m ³ | Relación Agua/Cemento | PCM (% total w.) | Fibra de Vidrio (% total vol.) | WR aditivo (% cemento w.) |
|----------|---------------------------|-------------------------|-----------------------|------------------|--------------------------------|---------------------------|
| 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 Y DISCUSIÓN

3.1 Conductividad térmica y propiedades mecánicas.

Las pruebas de conductividad térmica se realizaron de acuerdo con ISO 8301: 1991 utilizando un equipo medidor de flujo de calor (Ahlborn) en materiales compuestos simples y PCM. La Figura 2 muestra la configuración de la prueba de conductividad térmica. Se utilizaron muestras con dimensiones de 350 x 350 x 25 mm para las mediciones de conductividad térmica y se mantuvieron en agua saturada con cal a 21 ± 1 °C de temperatura durante 28 días. Las muestras se secaron a 60 °C hasta que alcanzaron un peso constante para evitar cualquier error de prueba basado en la humedad. Las pruebas comenzaron cuando la muestra llegó a temperatura ambiente. La determinación de la conductividad térmica se realizó en estado estable con una temperatura media de + 10 °C en el centro de la sección transversal de la muestra.



Figura 2. Configuración de la prueba de conductividad térmica.

La conductividad térmica de los paneles fue de 0.33 W / mK, 0.31 W / mK y 0.29 W / mK para paneles que incluyen 0%, 2.5% y 5% PCM en masa total, respectivamente. Aunque la relación de PCM conduce a un cambio en los valores de conductividad térmica, este cambio no es significativo cuando se evalúa desde el punto de vista del aislamiento térmico.

Las propiedades mecánicas de los materiales compuestos se basaron en la prueba de resistencia a la compresión uniaxial de 28 días y la prueba de flexión de cuatro puntos de viga simple. Se realizaron pruebas de resistencia a la compresión en muestras de cubos de 40 mm. Para las pruebas de flexión, se utilizaron muestras de viga de 45 mm de ancho y 25 mm de altura. La longitud de la viga era de 350 mm mientras que la longitud del tramo era de 300 mm. Se usó una máquina de prueba de circuito cerrado (MTS Criterion 5500) en ambas pruebas y se generaron curvas de deflexión de carga en las pruebas de flexión. Los valores específicos de energía de fractura (Wf) de las muestras también se determinaron de acuerdo con la recomendación del Comité Técnico RILEM 50-FMC (RILEM TCS, 1985). Las pruebas se realizaron a 18 °C. Se analizaron cinco muestras individuales para cada grupo.

La Figura 3 muestra los resultados de la prueba de resistencia a la compresión. De la figura se desprende que a medida que aumenta la relación PCM, disminuye la resistencia a la compresión de la matriz. Cuando se examina la variación de los valores de resistencia a la compresión con las relaciones de matriz PCM, la resistencia a la compresión de la matriz se reduce en un 7,5% y un 10% cuando el PCM se utiliza en un 2,5% y un 5%, respectivamente.

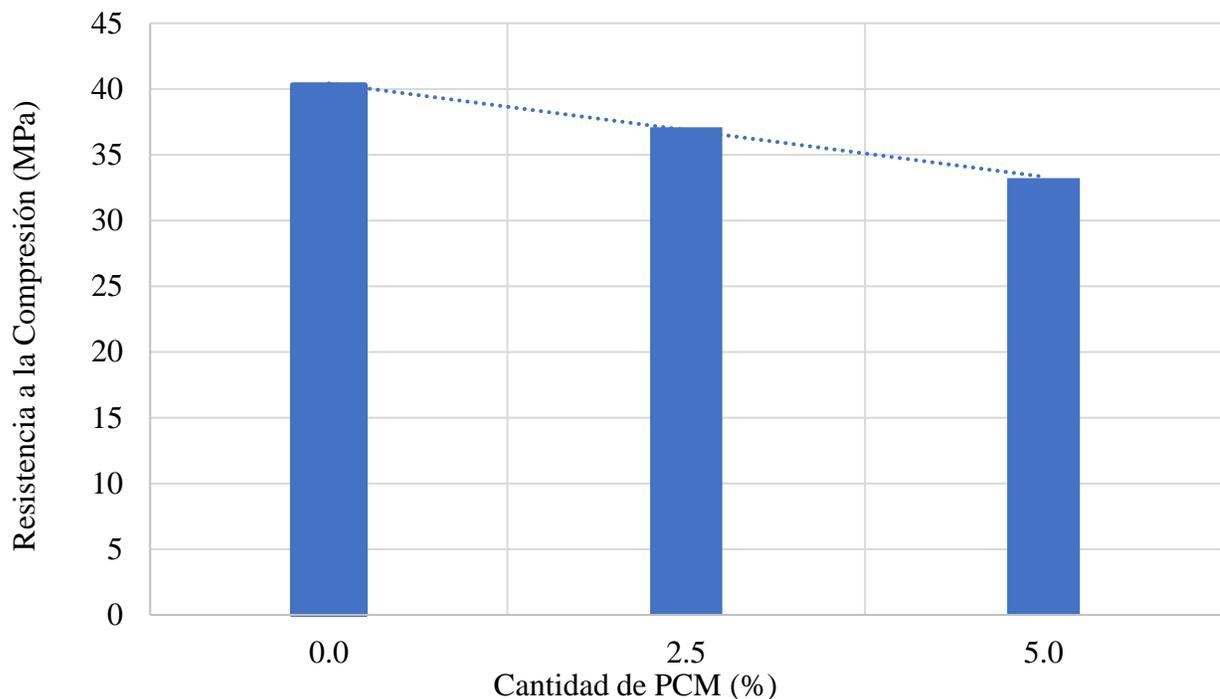


Figura 3. Relación de la resistencia a la compresión con la relación PCM de los paneles.

La Figura 4 muestra la variación de los valores de resistencia a la flexión con la cantidad de PCM. Está claro que la resistencia a la flexión disminuye a medida que aumenta la cantidad de PCM en la mezcla. Cuando el contenido de PCM es de 2.5% y 5%, las resistencias a la flexión disminuyen en 7% y 13%, respectivamente.

La Figura 5 muestra la variación de los valores específicos de energía de fractura con la cantidad de PCM. Los valores específicos de energía de fractura aumentan a medida que aumenta la cantidad de PCM de la mezcla en contraste con los valores de resistencia. El aumento específico de la

energía de fractura fue de 31% y 40% para relaciones PCM de 2.5 y 5%, respectivamente. Este aumento en los valores específicos de energía de fractura puede atribuirse a un aumento en la capacidad de deformación. A medida que aumenta la cantidad de PCM en la mezcla, la ductilidad de los compuestos también aumenta debido al valor específico de la energía de fractura.

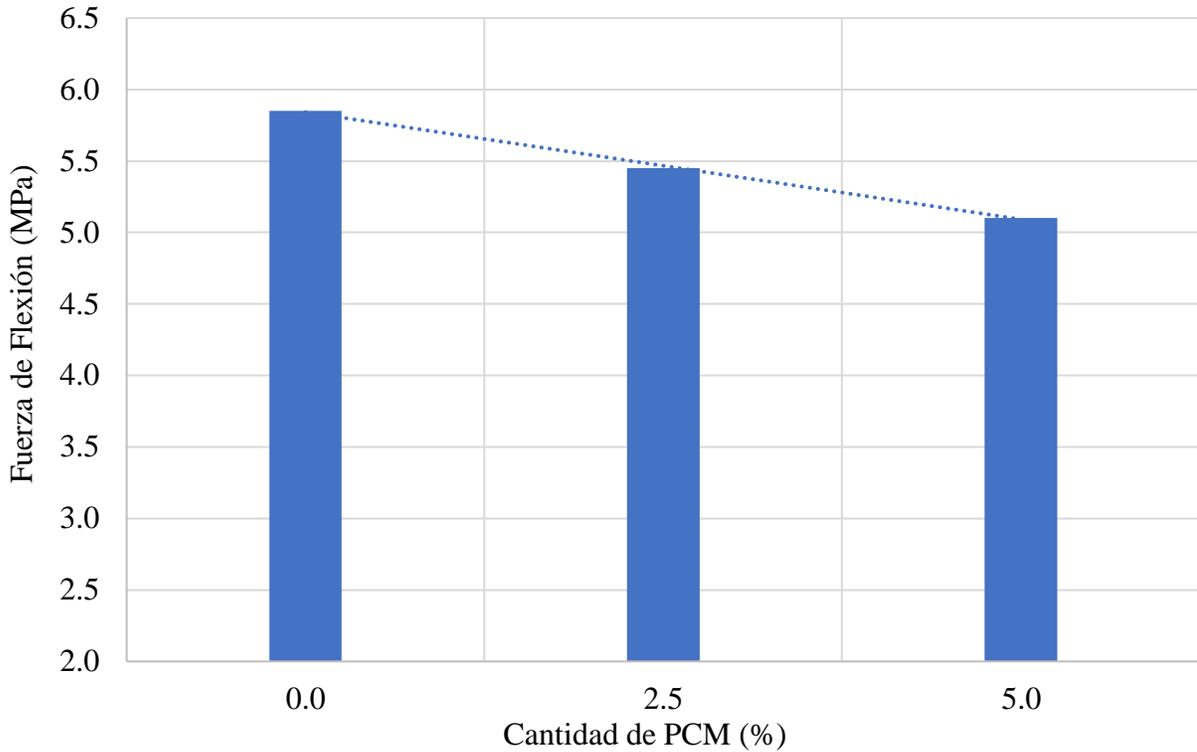


Figura 4. Relación de la resistencia a la flexión con la relación PCM de los paneles.

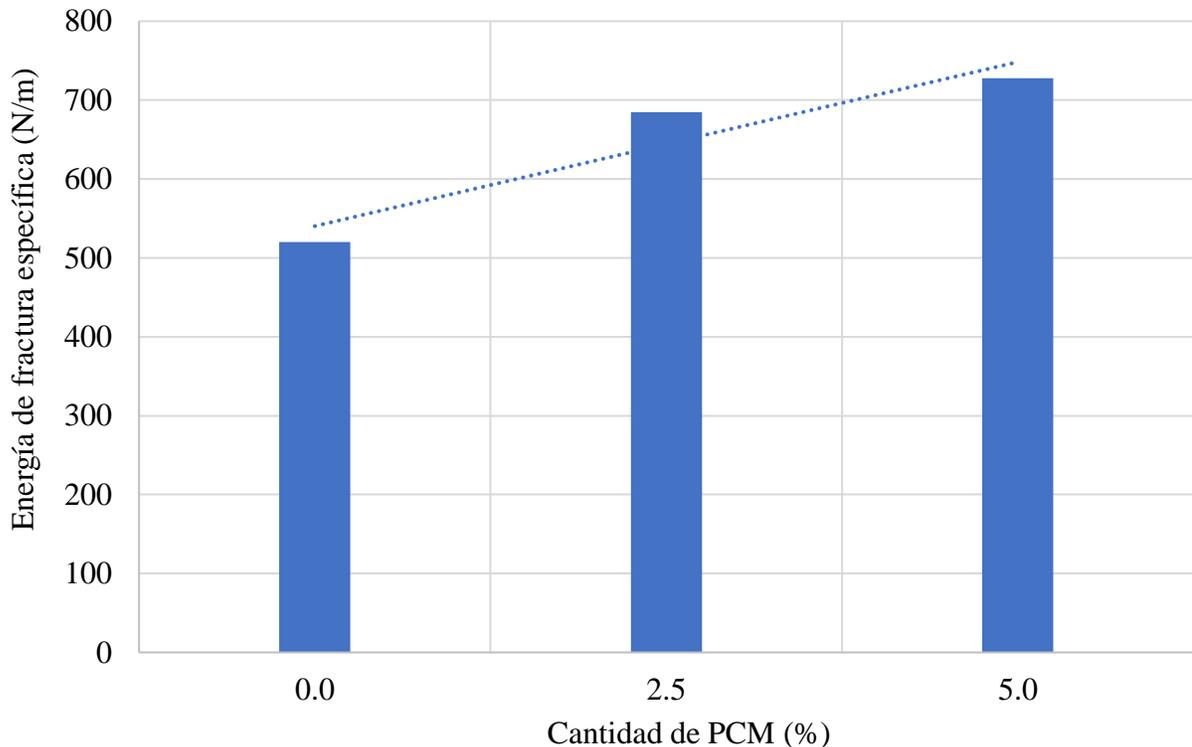


Figura 5. Relación de la energía de fractura específica con la relación PCM de los paneles.

1.1 Microestructura

La micrografía del PCM microencapsulado en la matriz de cemento se muestra en la Figura 6. Cuando observamos la Figura 6, se puede decir que el PCM microencapsulado proporciona una buena unión con la matriz de cemento y no hay grietas en la interfaz. Sin embargo, se observa que el PCM conserva su forma esférica. Esto muestra que los PCM microencapsulados durante la mezcla, el procesamiento y el curado pueden usarse sin deterioración.

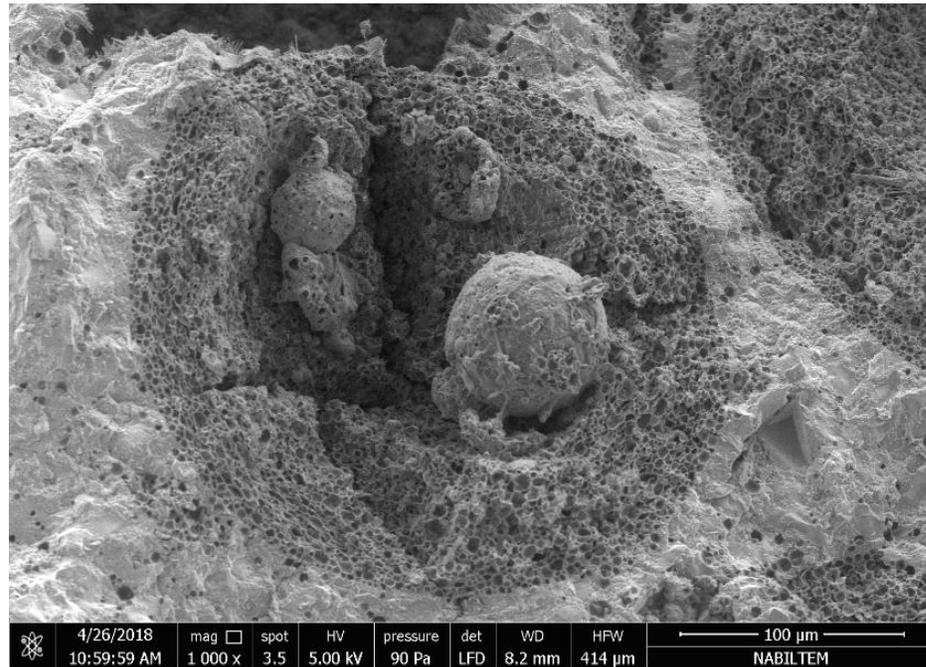
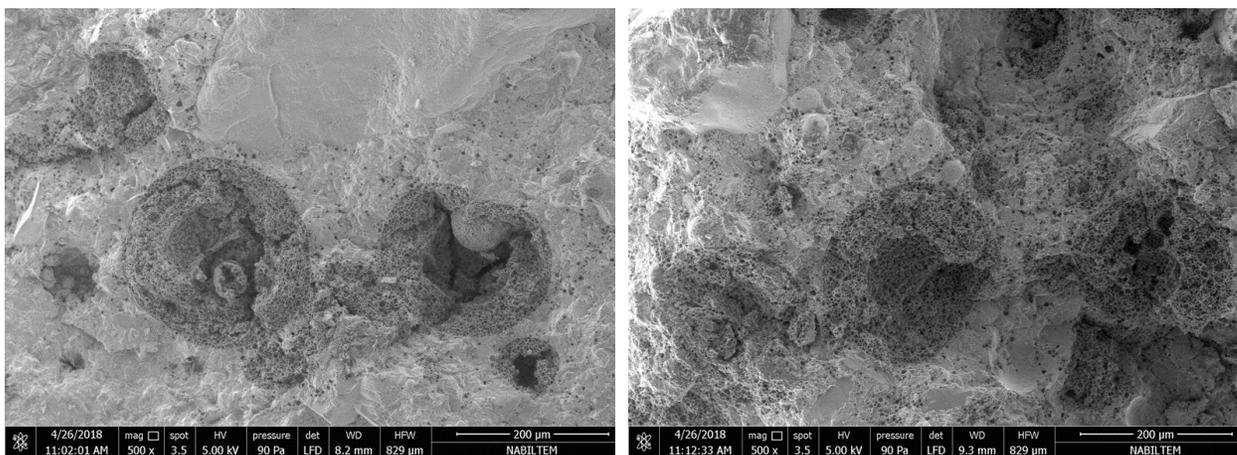


Figura 6. PCM microencapsulada en matriz de cemento.

En la Figura 7, la distribución de PCM microencapsulados en la matriz basada en cemento se muestra en el caso de usar PCM en diferentes proporciones.

Las Figuras 7a y 7b muestran imágenes de SEM de mezclas que contienen 2.5% y 5% de PCM, respectivamente. Está claro que los PCM microencapsulados se colocan más cerca uno del otro al 5% de uso, pero las cápsulas de PCM no se contactan entre sí mientras se preserva la integridad de la fase de mortero entre ellas.



(a) 2.5% PCM

(b) 5.0% PCM

Figura 7. Distribución de PCM microencapsulada en matriz de cemento.

3.3 Desempeño del calor térmico almacenado

Las paredes internas de dos habitaciones de tamaño equivalente se cubrieron con las muestras de panel producidas y se monitorearon los cambios de temperatura en las habitaciones. Los paneles sin PCM se aplicaron a una de las habitaciones, mientras que las muestras de panel que contenían PCM con un 5% se aplicaron a la otra habitación. Para obtener el mejor rendimiento del PCM, se realizaron mediciones en las salas equivalentes con un volumen de 50 m³ construido en el edificio principal del laboratorio. El aire acondicionado del laboratorio principal se apagó durante cuatro días durante las vacaciones y se permitió que la temperatura en el laboratorio principal fluctuara dependiendo de las condiciones naturales. En este proceso, la temperatura máxima en el laboratorio alcanzó 28 °C durante las horas diurnas y la temperatura mínima permaneció en 15 °C durante las horas nocturnas. La fluctuación máxima en la habitación se midió como 3 °C en la habitación donde se usaron paneles sin PCM, mientras que 1 °C se usó para la habitación donde se usaron PCM incluyendo paneles.

4. CONCLUSIONES

Dentro del alcance de este estudio experimental, se pueden extraer las siguientes conclusiones;

- Los paneles cementicios compuestos, incluidos los PCM, son prometedores en términos de propiedades mecánicas. Aunque el uso de PCM causa una disminución en los valores de resistencia, esta disminución no es dramática para evitar el uso de los paneles compuestos in situ. Además, el uso de PCM ayuda a aumentar los valores específicos de energía de fractura.
- Aunque la proporción de PCM utilizada conduce a un cambio en los valores de conductividad térmica, este cambio no es significativo cuando se evalúa desde el punto de vista del aislamiento térmico.
- La fluctuación máxima medida en la habitación fue de 3 °C en la habitación donde se usaron paneles sin PCM, mientras que 1 °C fue medido para la habitación donde se usaron paneles que incluyen PCM.

5. REFERENCIAS

- 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 theacceptable 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