

INNOVACIÓN SOSTENIBLE EN LA CONSTRUCCIÓN: MATERIALES DE CAMBIO DE FASE PARA EL ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA TÉRMICA

Norma López-Pérez^{1,2}, Isabel Lado-Touriño², Olga Bernaldo-Pérez²

¹Tecnológico Nacional de México- Instituto Tecnológico de Pachuca

²Escuela de Arquitectura, Ingeniería, Ciencia y Computación, Universidad Europea de Madrid

norma.lp@pachuca.tecnm.mx, misabel.lado@universidadeuropea.es,

mariaolga.bernaldo@universidadeuropea.es

Resumen: El creciente consumo energético destinado al confort térmico en edificaciones hace necesario impulsar estrategias de descarbonización en el sector de la construcción. En este contexto, los materiales de cambio de fase (PCM) representan una alternativa eficaz para mejorar la eficiencia energética gracias a su capacidad de almacenar y liberar calor durante procesos de fusión y solidificación. Este trabajo tiene como objetivo determinar el método más adecuado para encapsular el polietilenglicol 600 (PEG 600) en una matriz de sílice, comparando dos procedimientos: la síntesis química mediante un método sol-gel y la impregnación directa en un material poroso. Los materiales obtenidos, denominados PSPCM (Phase-Stabilized Phase Change Materials), se caracterizaron mediante calorimetría diferencial de barrido (DSC), espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) y medición de conductividad térmica. Posteriormente, se incorporaron en yeso con el fin de evaluar su capacidad de absorción de calor como material de recubrimiento. Los resultados muestran que el método sol-gel permite una mejor encapsulación del PEG 600 en la red de sílice, ofreciendo una mayor estabilidad térmica y un mejor desempeño en la absorción de calor, lo que lo posiciona como una alternativa prometedora para el desarrollo de materiales de construcción energéticamente eficientes.

Palabras clave: Eficiencia energética, PCM, PSPCM, proceso sol-gel

1. INTRODUCCIÓN.

Ante el incremento de las olas de calor derivadas del cambio climático, la inestabilidad geopolítica y el elevado consumo energético asociado a los edificios, responsables de aproximadamente el 40% del consumo total de energía en la Unión Europea [1], la descarbonización del sector de la construcción se presenta como una necesidad urgente para mejorar la eficiencia energética y mitigar los efectos del calentamiento global. En este contexto, los materiales de cambio de fase (PCM) constituyen una alternativa eficaz para optimizar el rendimiento energético y el confort térmico de las edificaciones, gracias a su capacidad de almacenar y liberar energía durante los procesos de fusión y solidificación. Estos materiales absorben calor al pasar del estado sólido al líquido y lo liberan al retornar al estado sólido [2]. Para evitar fugas en su fase líquida, los PCM se encapsulan en matrices poliméricas o materiales porosos, generando los denominados phase-stabilized phase change materials (PSPCM) [3]. Entre los PCM, se encuentra el polietilenglicol (PEG) que, destaca por ser un polímero ecosostenible con propiedades sobresalientes, como su elevado calor latente, amplio rango de temperatura de transición, estabilidades térmica y química, no toxicidad, baja presión de vapor, ausencia de sobreenfriamiento y estabilidad volumétrica a largo plazo. Por su parte, el dióxido de silicio puede ser utilizado como matriz, ya que ofrece una estructura altamente porosa y estable, tanto térmica como químicamente, lo que lo convierte en un recubrimiento ideal para la encapsulación del PEG. [4].

Uno de los métodos más empleados para la encapsulación de materiales PCM es la síntesis química mediante el proceso sol-gel. Este procedimiento se basa en dos etapas de reacción: la hidrólisis y la condensación. Durante el proceso, se forma una suspensión coloidal denominada sol, compuesta por partículas finamente dispersas, que posteriormente sufre una polimerización progresiva hasta originar una red inorgánica tridimensional. El resultado es la formación de un gel, es decir, una fase continua líquida en la que se encuentra inmersa la estructura sólida del material sintetizado. [5]. Como alternativa al método sol-gel, la encapsulación también puede realizarse mediante impregnación directa, un procedimiento más sencillo que consiste en incorporar el PEG directamente en los poros de una matriz silíceas. En este proceso, el material de cambio de fase penetra por capilaridad y fuerzas de adsorción en la estructura porosa del soporte, quedando físicamente retenido en su interior. Aunque este método no genera enlaces químicos entre el PEG y la matriz, permite obtener compuestos funcionales con capacidad de almacenamiento térmico adecuada y una preparación menos compleja [4].

La caracterización y evaluación del desempeño de los PSPCM se realiza mediante diferentes técnicas, entre las que destacan: la calorimetría diferencial de barrido (DSC), empleada para determinar las transiciones térmicas, la capacidad calorífica y la entalpía de fusión del material [6]; la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), utilizada para identificar los grupos funcionales y posibles interacciones químicas entre el PEG y la matriz de sílice [7]; y la medición de la conductividad térmica, que

permite evaluar la eficiencia en la transferencia de calor y determinar el comportamiento aislante o conductor del material [8].

El objetivo de esta investigación es evaluar la eficacia de dos métodos distintos de encapsulación del PEG 600 en una matriz de sílice: la síntesis química sol-gel y la impregnación directa, con el fin de desarrollar PSPCM e incorporarlos en yeso para mejorar la eficiencia energética en edificaciones.

2. MATERIALES Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Para la obtención de los materiales PSPCM se empleó PEG 600 (Sigma-Aldrich) como material de cambio de fase y gel de sílice 60 (Merck) como matriz porosa para la impregnación. En la síntesis química se utilizó trimetoxisilano (GLYMO, Sigma-Aldrich) como precursor de sílice y amoníaco al 30% (Carl Roth) como catalizador, además de etanol y agua desionizada como disolventes.

Los procedimientos experimentales seguidos se ilustran en la Figura 1 y se detallan a continuación. En ambos métodos, la proporción en peso entre el PEG 600 y el SiO₂ fue del 50%. Una vez sintetizado el material PSPCM, se incorporó al yeso en una proporción del 10%. A continuación, se prepararon probetas con esta mezcla para evaluar su desempeño térmico, específicamente su capacidad de absorción de calor.

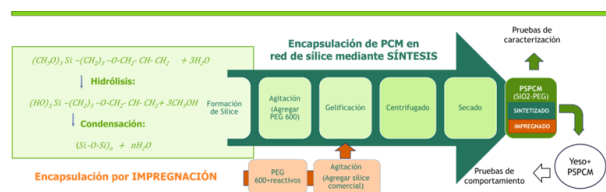


Figura 1. Procedimiento experimental para la obtención de materiales PSPCM.

2.1 Método de síntesis.

Para aplicar el método sol-gel, se colocó en un matraz el trimetoxisilano disuelto en etanol, y se añadieron cantidades estequiométricas de agua y amoníaco bajo agitación magnética, favoreciendo la hidrólisis y posterior condensación de los grupos silanoles. Después se incorporó lentamente el polietilenglicol PEG600 y se mantuvo bajo agitación continua durante 24 h. El proceso de gelificación se llevó a cabo a temperatura ambiente, dejando reposar la mezcla durante 24 h. Posteriormente, el gel formado fue sometido a centrifugado para eliminar el exceso de reactivos y disolventes. Finalmente, el material se secó en horno a una temperatura de 60 °C durante 48 h hasta obtener el material PSPCM.

2.2 Método de impregnación.

Como técnica comparativa, se empleó el método de encapsulación por impregnación directa, utilizando gel de sílice 60 como soporte y etanol como disolvente. El PEG 600 se incorporó directamente al sistema mediante

agitación mecánica, favoreciendo su distribución homogénea en la matriz porosa. Al igual que en el procedimiento sol-gel, la mezcla se mantuvo durante 24 horas a temperatura ambiente, y posteriormente se sometió a un proceso de centrifugación para eliminar los reactivos y disolventes residuales. Finalmente, el material fue secado en horno a 80 °C durante 24 horas, obteniéndose el PSPCM en estado sólido.

2.3 Elaboración de probetas de yeso.

Con los PSPCM obtenidos mediante síntesis e impregnación, se elaboraron tres probetas de yeso blanco utilizando moldes de silicona. En la tabla 1 se muestra la composición de las probetas elaboradas.

Tabla 1. Composición de las probetas de yeso, sin y con PSPCM incorporados.

PROPORCIONES EN LA COMPOSICIÓN DE PROBETAS DE YESO BLANCO					
YESO PURO		YESO CON PSPCM SINTETIZADO		YESO CON PSPCM IMPREGNADO	
MATERIAL	PESO (g)	MATERIAL	PESO (g)	MATERIAL	PESO (g)
YESO (60%)	42,6	YESO (60%)	40	YESO (60%)	40
AGUA (40%)	28,4	AGUA (40%)	27	AGUA (40%)	27
---	---	PSPCM SINTETIZADO (10%)	4	PSPCM IMPREGNADO (10%)	4
PESO TOTAL (g)	71	PESO TOTAL (g)	71	PESO TOTAL (g)	71

3. RESULTADOS.

3.1 Apariencia física.

Los PSPCM obtenidos mediante síntesis muestran un tamaño de grano mayor que el obtenido mediante impregnación directa, el cual se observa como un polvo más fino (Figura 2).

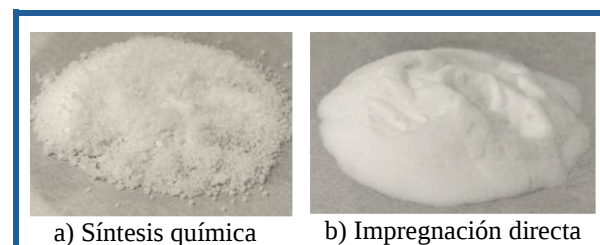


Figura 2. Apariencia física de los PSPCM obtenidos mediante los dos métodos.

3.2 Calorimetría diferencial de barrido (DSC).

Las curvas DSC (Figura 3), muestran que el PEG 600 puro y los materiales PSPCM formados mediante síntesis química e impregnación directa presentan una transición endotérmica en torno a 21 °C, atribuida al proceso de fusión del PEG 600. El máximo de la señal endotérmica se observa aproximadamente a 22 °C, valor coherente con la temperatura de fusión característica de este polímero. Respecto a la amplitud del pico endotérmico, los PSPCM presentan una transición endotérmica más amplia, extendiéndose hasta aproximadamente 118 °C. Este incremento y ensanchamiento del evento térmico sugieren la presencia de interacciones químicas entre el PEG y los grupos silano, así como posibles procesos de

evaporación de solventes y condensación de silanoles. El valor de C_p refleja la capacidad del material para almacenar energía térmica. El PEG 600 puro muestra el mayor C_p (2,822 J/g·°C), lo que indica una transición completa y libre del material. En cambio, cuando el PEG se encuentra encapsulado en sílice, el C_p disminuye notablemente, a 1,322 J/g·°C en el material sintetizado por sol-gel y a 1,106 J/g·°C en el impregnado, evidenciando que una parte significativa del PEG queda confinada o interactúa con la matriz de SiO_2 , limitando su movilidad y reduciendo la cantidad de material que participa en la fusión. En conjunto, los resultados confirman que el confinamiento dentro de la matriz de sílice reduce la capacidad calorífica y, por tanto, la fracción de PEG con comportamiento térmico libre.

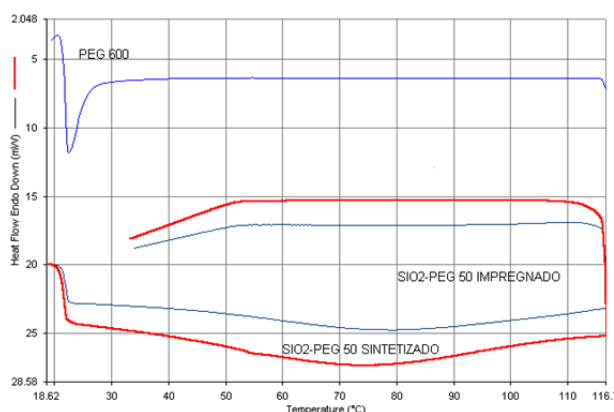


Figura 3. Transiciones térmicas del PEG 600, y de los PSPCM obtenidos mediante síntesis química e impregnación.

Tabla 2. Valores de C_p obtenidos en los PSPCM en comparación con el del PEG 600.

Material	C_p (J/g °C)
PEG 600	2,822
SiO_2 -PEG600 impregnado	1,106
SiO_2 -PEG600 sintetizado	1,322

3.3 Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR).

En la Figura 4 se muestran los correspondientes espectros de FTIR. Tomando como referencia el espectro del PEG 600 puro y de acuerdo con los resultados descritos en la literatura [7], se identificaron las bandas características en $\sim 3450 \text{ cm}^{-1}$, correspondientes a la vibración de los grupos hidroxilo ($-\text{OH}$), y en $\sim 2880\text{--}2850 \text{ cm}^{-1}$, asociadas a las vibraciones de los enlaces C-H de los grupos metileno ($-\text{CH}_2-$). En los materiales PSPCM se mantienen las bandas características del PEG600, aunque la notable mayor intensidad de estas señales en el material sintetizado evidencia una mejor dispersión molecular del polímero y sugiere la formación de enlaces de hidrógeno entre los grupos silanol (Si-OH) de la matriz y los terminales $-\text{OH}$ del PEG. Adicionalmente, la

aparición de una banda en $\sim 950 \text{ cm}^{-1}$, atribuible a enlaces Si-O-C , respalda la formación de uniones covalentes en el compuesto sintetizado. En conjunto, estos hallazgos demuestran que la ruta sol-gel favorece una integración química y estructural significativamente mayor del PEG en la red de sílice, mientras que la impregnación da lugar a una retención superficial y una interacción más débil del polímero.

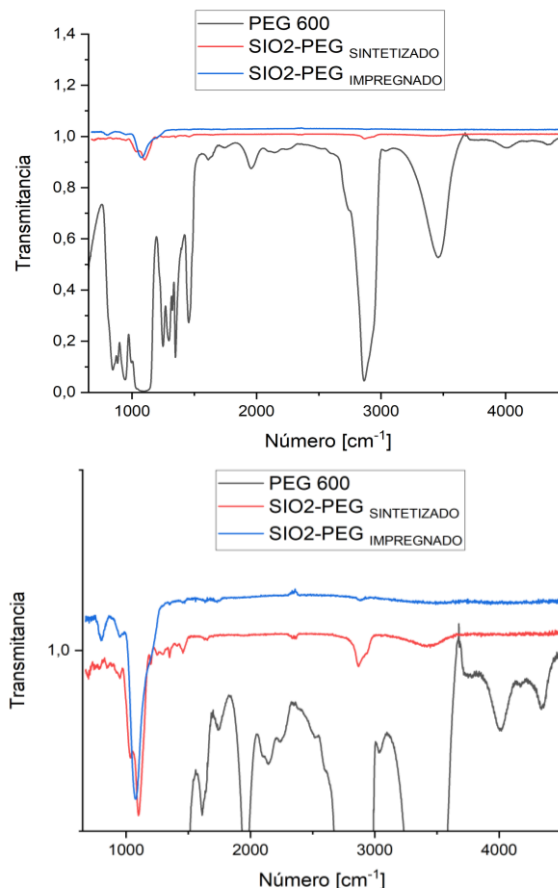


Figura 4. Gráficas de espectrometría FTIR comparando los PSPCM obtenidos.

3.4 Conductividad térmica.

En la tabla 3 se muestran los valores medidos para la conductividad térmica tanto de los componentes puros como de sus mezclas. Los resultados muestran que la incorporación del PSPCM reduce la conductividad térmica del yeso puro, mejorando su capacidad aislante. El compuesto yeso + SiO_2 -PEG (50:50) sintetizado presenta la menor conductividad entre los materiales con yeso (0,459 W/m·K), lo que indica un mejor aislamiento respecto al yeso puro (0,492 W/m·K). En general, el SiO_2 -PEG sintetizado es el material más aislante del conjunto (0,047 W/m·K), mientras que el PEG 600 es el más conductor (0,175 W/m·K). Estos resultados confirman que la combinación de sílice y PEG puede modular eficazmente la conductividad térmica, permitiendo ajustar las propiedades térmicas del yeso según la aplicación deseada.

Sin embargo, para optimizar la transferencia térmica sin comprometer la estabilidad del sistema, sería recomendable incorporar aditivos de alta conductividad,

como nanoplaquetas de grafeno, que actúen como puentes térmicos entre el PCM y la matriz. Este enfoque permitiría reducir la resistencia térmica y mejorar la eficiencia en aplicaciones de almacenamiento energético.

Tabla 3. Valores de conductividad térmica (W/m·K).

Material	W/m·K
SiO ₂ -PEG (50:50) SINTETIZADO	0,047
SiO ₂ -PEG (50:50) IMPREGNADO	0,058
PEG 600	0,175
SiO ₂ COMERCIAL	0,054
SiO ₂ SINTETIZADO	0,059
YESO PURO	0,492
YESO+SiO ₂ -PEG (50:50) SINTETIZADO	0,459
YESO+SiO ₂ -PEG (50:50) IMPREGNADO	0,481

3.5 Comportamiento en la absorción de calor.

Las curvas de evolución térmica (Figura 5) de las probetas de yeso evidencian que la incorporación de PSPCM reduce la velocidad de calentamiento y aumenta la temperatura máxima alcanzada en comparación con el yeso puro, lo que indica un aumento en la inercia térmica del material. Entre los métodos evaluados, el de síntesis química sol-gel muestra el mejor comportamiento amortiguador, seguido por el de impregnación directa, confirmando que la presencia del PCM encapsulado mejora la capacidad de almacenamiento térmico. Este efecto contribuye a estabilizar las variaciones de temperatura, aunque implica una menor conductividad global, lo que podría ralentizar la transferencia de calor en aplicaciones dinámicas.

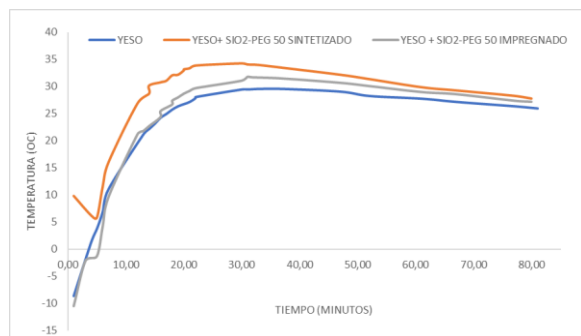


Figura 5. Curvas de variación de temperatura en las probetas de yeso puro y con PSPCM incorporados.

4. CONCLUSIONES.

En conclusión, el estudio demuestra que la incorporación de materiales de cambio de fase (PCM), en particular, el PEG 600 encapsulado en sílice (PSPCM), mejora la eficiencia energética de los materiales de construcción al incrementar su capacidad de almacenamiento térmico y reducir su conductividad. Entre los métodos evaluados, la síntesis química por sol-gel ofrece una encapsulación más efectiva, favoreciendo la formación de enlaces químicos entre el

PEG y la matriz de sílice. Esto se traduce en una mayor estabilidad térmica y mejor integración estructural. Así mismo, este método evidencia un mejor desempeño en la absorción de calor, evidenciando una mayor inercia térmica en las probetas de yeso. Los resultados confirman que, aunque ambos métodos son viables para obtener compuestos híbridos con propiedades térmicas ajustables, el método sol-gel permite una encapsulación más efectiva del PEG 600 dentro de la matriz de sílice. En consecuencia, este enfoque se perfila como una alternativa prometedora para el desarrollo de materiales de construcción con un desempeño energético optimizado.

5. AGRADECIMIENTOS.

A la Escuela de Arquitectura, Ingeniería Ciencia y Computación de la UEM, por financiar la inscripción al Congreso Materdivulga 2025.

6.- REFERENCIAS

- [1] Council of the European. 'Fit for 55': Council and Parliament reach deal on proposal to revise energy performance of buildings directive [press release]. 2023. <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2023/12/07/fit-for-55-council-and-parliament-reach-deal-on-proposal-to-revise-energy-performance-of-buildings-directive/pdf/>
- [2] Kalaiselvam S, Parameshwaran R. Chapter 5: Latent Thermal energy Storage. In Thermal energy storage technologies for sustainability: systems design, assessment, and applications, 2014, pp. 83–126.
- [3] Nasr Y, El Zakhem H, Hamami AEA, El Bachawati M, Belarbi R. Comprehensive Review of Innovative Materials for Sustainable Buildings' Energy Performance. Energies, 2023, 16, 7440.
- [4] Mitran R-A, Ioniță S, Lincu D, Berger D, Matei C. A Review of Composite Phase Change Materials Based on Porous Silica Nanomaterials for Latent Heat Storage Applications. Molecules, 2021, 26, 241.
- [5] Ibrahim S., Ibrahim H. Preparation and study properties of xerogel silica using sol-gel method. International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management, 2013, 2, 111.
- [6] Hatakeyama T., Quinn F.X. Thermal analysis. Fundamentals and Applications to Polymer Science. Wiley.1995.
- [7]. Wade L.G. Química Orgánica. Pearson Education. 2011.
- [8]. Bourbia S., Kazeoui H., Belarbi R., A review on recent research on bio-based building materials and their applications. Materials for Renewable and Sustainable Energy. 2023,12, 117.