

SOLUCIONES INNOVADORAS DE FACHADAS PREFABRICADAS DE HORMIGÓN CON PCMS PARA EDIFICIOS DE CONSUMO DE ENERGÍA CASI NULO

M. Carmen Guerrero Delgado, José Sánchez Ramos, Servando Álvarez Domínguez, Grupo de Termotecnia, AICIA, Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla, Camino de los Descubrimientos S/N, 41092 Sevilla, España.

Luisa F. Cabeza, Lidia Navarro Farre, GREA Innovació Concurrent, Universidad de Lleida, C/ Pere de Cabrera, Lleida, España

José Antonio Tenorio Rios, Lorenzo Olivarri, Instituto de las Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, CSIC, C/ Serrano Galvache 4, Madrid, España.

César Bartolomé Muñoz, Instituto Español del Cemento y sus aplicaciones, C/ José Abascal 53, Madrid, España

Rafael de Álvaro, INDAGSA, Grupo Ortiz, Av. del Ensanche de Vallecas 44, Madrid, España.

* Correspondencia: mguedel@aicia.es, Tél.: 9544822254

Resumen:

El uso combinado de los sistemas de almacenamiento de energía térmica (TES) y los sistemas de construcción térmicamente activados (TABS) tiene un gran potencial de ahorro de energía, lo que permite una integración y gestión eficientes de las fuentes de energías renovables en los edificios. En este trabajo se presentan los estudios para obtener el potencial de una nueva solución TABS con dos innovaciones con respecto a las existentes en el mercado: su activación se hace mediante agua caliente/fría producida mediante sistemas renovables; y su elemento estructural de hormigón además de tener acoplado el intercambiador presenta un mortero innovador dopado con material de cambio fase microencapsulado PCM.

Palabras clave: material de cambio de fase, almacenamiento de energía térmica, sistemas de edificios con activación térmica, pared radiante.

INTRODUCCIÓN

La realidad energética de España, unida a la carestía energética existente a nivel mundial, ha provocado un doble efecto. Por un lado, los usuarios son cada vez más conscientes del coste energético al que se enfrentan y, por otro lado, las administraciones públicas han tomado consciencia de la importancia de limitar el consumo energético en la edificación como vía para combatir el cambio climático y reducir la dependencia energética con el exterior.

Esta situación (ODYSE, 2015; Santamouris, 2016) supone una gran oportunidad para soluciones constructivas innovadoras con un comportamiento energético que supere el enfoque tradicional de reducción de la transmitancia, cuyos beneficios están limitados, y actúen como acumuladores energéticos de ciclo corto, reduciendo la demanda energética del edificio y con un potencial muy superior al de los materiales aislantes, que por otro lado son imprescindibles.

En este contexto, las estrategias que tienen como objetivo reducir las necesidades de calor y frío aumentando el nivel de confort térmico de los edificios, tales como los sistemas de almacenamiento térmicos (TES) y los sistemas de activación térmica (TABS), han ganado interés al proporcionar un alto potencia de ahorro energético (Arce, Medrano, Gil, Oró, & Cabeza, 2011). La implementación de técnicas de almacenamiento térmico mejora la eficiencia energética de edificios al reducir las necesidades punta (costes), desacoplar las necesidades del edificio de los sistemas de producción. Asimismo favorecen la integración de fuentes renovables y la posibilidad de una gestión energética eficiente (de Gracia & Cabeza, 2015; Heier, Bales, & Martin, 2015).

Este trabajo se presenta una solución innovadora de TABS activada mediante tuberías de agua. Además de las ventajas comentadas, la solución presenta una alta inercia térmica probada que garantiza una reducción sensible de costes (Romani, de Gracia, & Cabeza, 2016; Saelens, Parys, & Baetens, 2011). Además, el calor que irradian estos elementos mejora la condiciones de confort (medio plazo) al mejora la distribución térmica interior, lo que supone una ventaja competitiva con respecto a los sistemas convectivos convencionales (Corgnati & Kindinis, 2007; Henze, Felsmann, Kalz, & Herkel, 2008; Salvalai, Pfafferott, & Sesana, 2013).

Este trabajo se enclava dentro del proyecto INPHASE. El objetivo del proyecto (2016-2018) es desarrollar un nuevo panel prefabricado para fachadas de edificios residenciales (viviendas, hoteles, residencias universitarias, residencias de ancianos, etc.) ejecutado de forma industrializada con sistemas convencionales que presente una elevada inercia térmica mediante la integración de hormigón y materiales de cambio de fase (PCMs), que reduzca la demanda energética de dichos edificios, consiguiendo así, sin necesidad de aplicar medidas adicionales, un cerramiento orientado a utilizarse en los nuevos edificios de consumo de energía casi nulo. Esta solución constructiva de nuevo desarrollo puede integrar los materiales de cambio de fase, bien en la matriz de hormigón, bien en la solución constructiva fuera de la matriz de dicho material. Ambas líneas de trabajo presentan ventajas, pero también ciertos desafíos tecnológicos que son necesarios superar mediante la realización del proyecto INPHASE.

El principal reto al que se enfrenta el proyecto es la industrialización de una tecnología que se ha probado eficaz en la mejora del comportamiento energético de soluciones constructivas, pero cuyo proceso de fabricación no ha pasado de la fase experimental, lo que ha impedido la comercialización de soluciones de alta inercia térmica en base la utilización de materiales de cambio de fase.

Otra de las barreras de estas soluciones es superar es el diseño de un sistema de activación que, mediante una distribución estratégica y homogénea de los materiales de cambio de fase, permita su activación en un periodo de tiempo lo suficientemente corto como para permitir su carga y su descarga en ciclos de 24 horas o superiores.

Para la consecución de estos objetivos, se modelan tanto los materiales como las soluciones constructivas que esbozadas; y una vez seleccionados aquellos con mayor potencial, se han realiado prototipos monitorizados que permitirán la verificación a escala real de sus prestaciones energéticas. Asimismo se desarrollan todos los componentes necesarios para la comercialización de la solución innovadora: nuevos morteros, emparrillado de tubos, líneas de fabricación...

METODOLOGÍA

El trabajo de investigación se puede separar en dos partes: la parte experimental en la que además de probar el prototipo en el futuro, desarrolla toda la labor necesaria para la creación de los nuevos materiales así como su estandarización; y la parte teórica en la que vía simulación se diseña la solución óptima para el sistema y las variaciones de la misma en función del potencial posible.

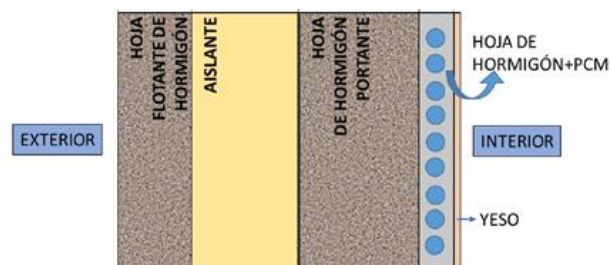


Figura 1. Esquema de la solución innovadora en desarrollo

Para que toda la cadena de valor quede desarrollada desde el nivel de desarrollo tecnológico de partida de la solución hasta su integración en un entorno coherente (justo antes de su salida a mercado), se establecen dos bloques de trabajo: un bloque de trabajo experimental diseñado a partir de estudios teóricos vía simulación que permitirá la validación de modelos; y un bloque de simulación con el que obtener herramientas de replicabilidad que permitan obtener la base de conocimiento necesaria para que el modelo de negocio vinculado a la solución quede consolidado.

Bloque experimental

El elemento singular es el mortero sobre el que se fija en el emparrillado de tubos y además se añade el material de PCM. Para ello se han analizado lechadas y morteros. El mortero se obtiene de la mezcla de cemento CEM I 52.5 R, agregado fino, relleno de piedra caliza y PCM microencapsulado Micronal DS 5038X.

El objetivo general de la línea de investigación dentro de este trabajo se ha desarrollado es la formulación de un mortero mejorado con PCM para ser utilizado en componentes prefabricados de fachada térmicamente activados. De hecho, para esta aplicación específica, el material debe tener características específicas, tales como:

- Buena trabajabilidad y propiedades de autocompactación, con el fin de sustituir adecuadamente los hormigones autocompactantes convencionales utilizados en la construcción de los paneles prefabricados de fachada;
- Buena efusividad térmica (también llamada admitancia específica, coeficiente de penetración térmica o inercia térmica), con el fin de almacenar de manera útil una cantidad significativa de energía térmica en tiempos relativamente cortos bajo gradientes de baja temperatura.



Figura 2. Ejemplos de muestras de mortero analizadas para el cálculo de la conductividad térmica

Bloque simulación

Utilizando un modelo numérico tridimensional transitorio se ha calculado el campo de temperaturas natural (sin activación) de diferentes cerramientos exteriores en diferentes climas y para las dos estaciones de acondicionamiento (calefacción y refrigeración).

El objetivo del modelo es analizar la influencia de las diferentes variables de diseño que afectan a la solución propuesta; así como la eficiencia de almacenamiento. El modelo permite la resolución en detalle del transitorio del problema pudiendo calcular: la evolución de temperatura, la cantidad de calor almacenado en la masa térmica durante la activación del PCM; y la cantidad de calor útil aprovechada. A partir de estos flujos energéticos se puede calcular la eficiencia de almacenamiento, la cual se convierte en el indicador de toma de decisiones en fase de diseño.

RESULTADOS

En este epígrafe se muestran algunos de los resultados obtenidos vía simulación más relevantes. A partir de estos resultados del modelo detallado, se han descartado alternativas barajadas y se ha seleccionado la mejor alternativa para los experimentos que se realizarán en la próxima anualidad. Otro resultado de interés ha sido la importancia no solo de la activación del PCM para su carga, si no de la descarga hasta conseguir aprovechar toda la energía latente mediante su cesión desde el elemento al espacio

acondicionado. Este resultado se ha plasmado en estudio con carga durante un periodo de 6-8-10 h y descarga durante dos días. Se ha visto como la capacidad latente de la solución favorece la gestionabilidad del recurso renovable activador, al garantizar una autonomía de descarga superior a dos días desde el periodo de carga tomado.

Asimismo la energía almacenada y restituida calculada con el modelo CFD es el dato de entrada al análisis de sensibilidad en demanda. Con este análisis se estudia el efecto en la demanda de calefacción de la solución propuesta. Este análisis se hace en términos de porcentaje de reducción de la demanda de calefacción. Debido a que este sistema opera cíclicamente, se han considerado tres posibles ciclos de operación: ciclo de un día: carga y descarga en un día; ciclo de dos días: carga en un día y dos días descargando; y ciclo de tres días: carga y uno tres días de descargando.

En la siguiente tabla se muestra el efecto (Carga kWh/m² de fachada) de la temperatura del agua de activación y de la distancia entre tubos del intercambiador.

		Temperatura del agua (°C)				Carga Máxima
		30	35	40	45	
Distancia entre tubos (cm)	8		0.48			0.94
	10		0.46			0.94
	12	0.27	0.45	0.60	0.75	0.94
Carga Máxima		0.66	0.94	1.23	1.51	

		Temperatura del agua (°C)			
		30	35	40	45
Distancia entre tubos (cm)	8		51.1%		
	10		49.4%		
	12	41.8%	47.3%	48.7%	49.5%

Figura 3. Resultados tipo a partir de las simulaciones CFD de la solución diseñada

A partir de estos resultados se han descartado alternativas barajadas y se ha seleccionado la mejor alternativa para los experimentos que se realizarán en la próxima anualidad. Otro resultado de interés ha sido la importancia no solo de la activación del PCM para su carga, si no de la descarga hasta conseguir aprovechar toda la energía latente mediante su cesión desde el elemento al espacio acondicionado. Este resultado se ha plasmado en estudio con carga durante un periodo de 6-8-10 h y descarga durante dos días. Se ha visto como la capacidad latente de la solución favorece la gestionabilidad del recurso renovable activador, al garantizar una autonomía de descarga superior a dos días desde el periodo de carga tomado.

Para realizar el análisis mencionado se ejecutó un procedimiento que brevemente puede ser descrito de la siguiente manera:

1. Se tomaron dos viviendas promedio tipo, que por su diseño resultan representativas del parque edificatorio de viviendas en España. En particular cabe destacar que sus relaciones de área de fachada a área de suelo cubren la mayor parte del espectro de viviendas unifamiliares en España.
2. Se determina la energía almacenada y descargada por cada m2 de solución constructiva y se relaciona con respecto al área de suelo.
3. Se determinan las demandas de calefacción de estas viviendas en las cinco zonas climáticas de invierno de España y bajo distintos supuestos de calidades energéticas de tal manera que se ubiquen en la frontera de las clases energéticas A-B, B-C y C-D.
4. De la energía almacenada por la fachada se determina la cantidad que es útil para la reducción de la demanda mediante el el Factor de Utilización.
5. Se determina la fracción de demanda cubierta.

En total se tiene que se analizaron 360 casos. De los resultados de la simulación con el modelo simplificado, se pudo determinar que la solución propuesta tiene un elevado potencial para cubrir la demanda de calefacción ya que oscila entre un 99% en el mejor de los casos (vivienda con clase energética A, en zona climática A y con relación de área de fachada a área de suelo de 1.45) a aproximadamente un 50% en el peor de los casos (vivienda con clase energética entre D y C, en zona climática E y con relación de área de fachada a área de suelo de 0.51). (Nota: las clases energéticas están tomadas del Código Técnico de la Edificación actual). Un ejemplo de los resultados obtenidos es el que se muestra en las siguientes gráficas para las siguientes condiciones: zona climática D, viviendas unifamiliares con distintas clases energéticas, y $A_{fachada_opaca} / A_{suelo} = 1.45$

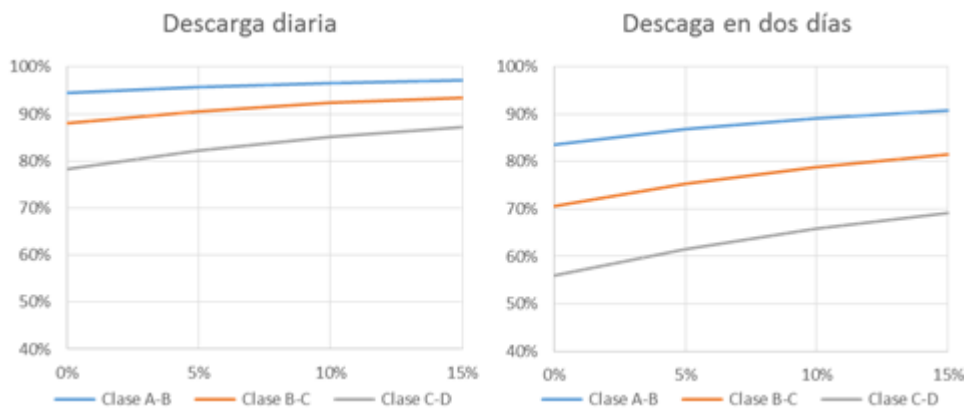


Figura 4. % de las necesidades de calefacción cubiertas en función del % de PCM embebido en la solución propuesta

Se observa que la cantidad o porcentaje de PCM embebido en la solución climática es más importante o tiene mayor efecto, cuando la descarga ocurre en dos o tres días que cuando ocurre en uno. Esto es debido a que se puede utilizar una mayor fracción del calor almacenado cuando la descarga se da en más de un día.

CONCLUSIONES

Entre los principales avances obtenidos en las primeras etapas de desarrollo del proyecto destaca, el nuevo diseño realizado del panel de fachada prefabricado de hormigón con PCM, de alta inercia térmica. Vinculados al trabajo de investigación que produce este desarrollo aparecen las siguientes conclusiones.

- Con una temperatura de cambio de fase de 25°C, elegida para invierno, la hoja interior del muro no actúa como barrera térmica en verano porque las temperaturas que se alcanzarán en ella serán del orden de dicho valor y no lograrán cambiarlo de fase. Lo mismo para verano. Si se diseña para invierno, al usarlo en verano en modo disipación sólo se tendría la contribución sensible. Si se diseña para verano, durante el invierno si se utilizara el sistema captando calor sólo se tendría la contribución sensible.
- La incidencia sobre la carga del calor transferido por los cerramientos opacos es mucho mayor en invierno que en verano.
- La elevada inercia de la solución, conferida por el material PCM, permite la descarga de la energía almacenada días después de la carga. Esto confiere un rango de funcionamiento amplio y adaptable a las limitaciones del recurso renovable. Es decir, ciclos de duración superior a un día reducen la dependencia al recurso renovable (coste inicial (tamaño/acumulación) y aplicabilidad climática).
- El modelo simplificado desarrollado ha permitido demostrar que, por muy mal que se haga, se pueden conseguir ahorros superiores al 50% en la demanda de calefacción. Lo que va a suponer un salto de clase de eficiencia B. Sin embargo, es bastante posible obtener dos saltos y ser un edificio de baja demanda de energía A (casi pasivo).
- Se propone utilizar un único material con cambio de fase alrededor de los 25°C. Para garantizar una transferencia eficaz durante el periodo de activación se propone agua como fluido de trabajo a

temperaturas entre 35°C y 50°C. Si se usase aire y debido fundamentalmente a su baja conductividad comparado con la del agua, para lograr la misma tasa de transferencia se necesitarían temperaturas muy superiores que impedirían la utilización racional de fuentes de calor renovables como la solar o la geotermia.

Actualmente se están fabricando dos células experimentales para probar la solución en un torno coherente. A partir de estos resultados experimentales se calibrarán las herramientas de simulación para desarrollar toda la cadena de valor necesaria para la industrialización del producto.

AGRADECIMIENTOS

Resultados obtenidos en el marco del proyecto INPHASE “Soluciones innovadoras de fachadas prefabricadas de hormigón con PCMS para edificios de consumo de energía casi nulo” financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad, dentro del Programa Estatal de Investigación, Desarrollo e Innovación Orientada a los Retos de la Sociedad, en el marco del Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación 2013-2016, y ha sido cofinanciado con FONDOS FEDER, con el objetivo de promover el desarrollo tecnológico, la innovación y una investigación de calidad.

REFERENCIAS

- Arce, P., Medrano, M., Gil, A., Oró, E., & Cabeza, L. F. (2011). Overview of thermal energy storage (TES) potential energy savings and climate change mitigation in Spain and Europe. *Applied Energy*, 88(8), 2764–2774. <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.01.067>
- Corngnati, S. P., & Kindinis, A. (2007). Thermal mass activation by hollow core slab coupled with night ventilation to reduce summer cooling loads. *Building and Environment*, 42(9), 3285–3297. <http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.08.018>
- de Gracia, A., & Cabeza, L. F. (2015). Phase change materials and thermal energy storage for buildings. *Energy and Buildings*, 103, 414–419. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.007>
- Energy efficiency trends and policies in the household and tertiary sectors. An analysis based on the ODYSSEE and MURE databases.* (2015).
- Heier, J., Bales, C., & Martin, V. (2015). Combining thermal energy storage with buildings – a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 1305–1325. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.031>
- Henze, G. P., Felsmann, C., Kalz, D. E., & Herkel, S. (2008). Primary energy and comfort performance of ventilation assisted thermo-active building systems in continental climates. *Energy and Buildings*, 40(2), 99–111. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.01.014>
- Romaní, J., de Gracia, A., & Cabeza, L. F. (2016). Simulation and control of Thermally Activated Building Systems (TABS). *Energy and Buildings*, 127, 22–42. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.057>
- Saelens, D., Parys, W., & Baetens, R. (2011). Energy and comfort performance of thermally activated building systems including occupant behavior. *Building and Environment*, 46(4), 835–848. <http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.10.012>
- Salvalai, G., Pfafferott, J., & Sesana, M. M. (2013). Assessing energy and thermal comfort of different low-energy cooling concepts for non-residential buildings. *Energy Conversion and Management*, 76, 332–341. <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.07.064>
- Santamouris, M. (2016). Innovating to zero the building sector in Europe: Minimising the energy consumption, eradication of the energy poverty and mitigating the local climate change. *Solar Energy*, 128, 61–94. <http://doi.org/10.1016/j.solener.2016.01.021>