

# Panel a base de arcilla y material de cambio de fase para el acondicionamiento pasivo de edificios

*Diseño, caracterización y análisis de alternativas de implementación*

**Lucía Campos Rosa**

**Trabajo Fin de Máster**

Máster Universitario en Ciudad y Arquitectura Sostenibles  
Curso 2020/2021





# **Panel a base de arcilla y material de cambio de fase para el acondicionamiento pasivo de edificios**

*Diseño, caracterización y análisis de alternativas de implementación*

## **Autora**

Lucía Campos Rosa

## **Directores**

Dra. Carmen Galán Marín

*Catedrática de Universidad, Universidad de Sevilla*

Dr. Francisco Jesús Lizana Moral

*Marie Curie Fellow, University of Oxford*

## **Trabajo Fin de Máster**

Máster Universitario en Ciudad y Arquitectura Sostenibles

Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla

Curso 2020/2021



<b>1. Introducción</b>	<b>4</b>
<b>2. Objetivos</b>	<b>12</b>
<b>3. Metodología de investigación</b>	<b>14</b>
<b>4. Estado del conocimiento</b>	<b>18</b>
4.1. Soluciones basadas en arcilla para edificación	18
4.2. Sistemas de almacenamiento de energía térmica	37
4.3. Soluciones de almacenamiento de energía térmica basadas en arcilla	49
<b>5. Caracterización material y desarrollo de nuevas soluciones constructivas</b>	<b>54</b>
5.1. Materiales	54
5.2. Procesos de caracterización térmica por metodología experimental y cálculo numérico	61
5.3. Comparación de prestaciones térmicas y discusión	74
<b>6. Evaluación de alternativas de aplicación a través de modelos numéricos</b>	<b>94</b>
6.1. Método computacional	94
6.2. Definición de caso de estudio y escenarios	95
6.3. Modelado numérico de la simulación	100
6.4. Resultados de la simulación y discusión	109
<b>7. Conclusiones</b>	<b>120</b>
<b>8. Futuras líneas de investigación</b>	<b>126</b>
<b>9. Bibliografía</b>	<b>128</b>
<b>Anexos</b>	<b>138</b>



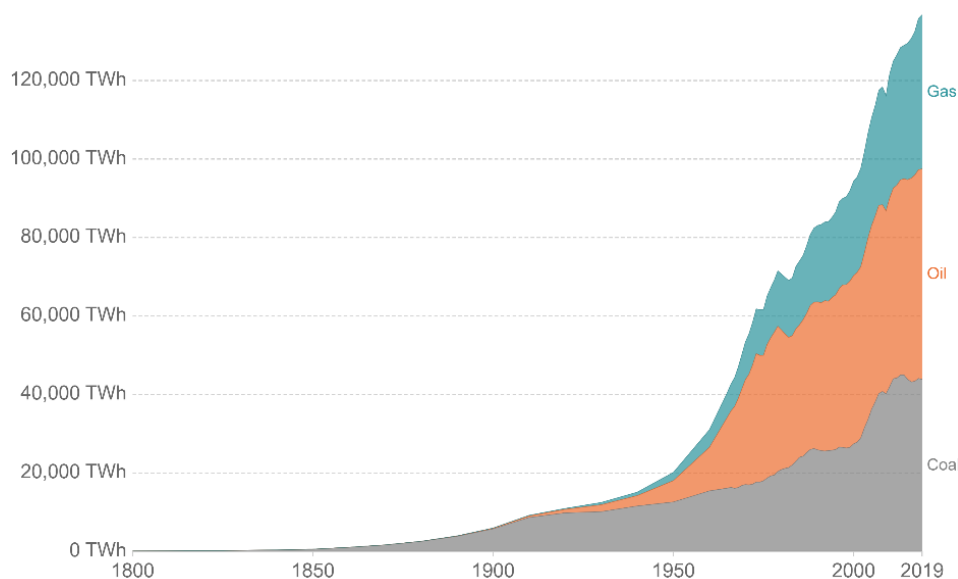
## 1. Introducción

*«Marco Polo describe un puente, piedra por piedra.  
—Pero ¿cuál es la piedra que sostiene el puente? —  
pregunta Kublai Kan.  
—El puente no está sostenido por esta piedra o por aquella —  
responde Marco—, sino por la línea del arco que ellas forman.  
Kublai permanece silencioso, reflexionando. Después añade:  
—¿Por qué me hablas de las piedras? Es sólo el arco lo que me importa.  
Polo responde:  
—Sin piedras no hay arco.» [1]*

El salto entre la proyección y la construcción en la arquitectura lo salva un puente: el puente que Marco Polo describe a Kublai Kan. La sinergia funcional que se deduce de este relato se encuentra en la base de todo proceso arquitectónico. La materialización de un proyecto exige la manipulación eficiente de la materia, y viceversa.

La práctica en esta manipulación eficiente de la materia ha tenido y tiene como principal recurso la energía. A lo largo de los siglos, las materias primas naturales (la piedra, el barro, la paja, la madera, entre otros), usadas por los pueblos ancestrales en las primeras prácticas constructivas [2], han sido sometidas a procesos de transformación cada vez más demandantes desde el punto de vista energético. Los avances en la ciencia y la tecnología de los cuales fueron testigos los siglos XIX y XX culminarían con una dominante industrialización de los procesos de construcción, donde los materiales innovadores (el cemento, el acero, el aluminio, entre otros) —hoy considerados convencionales— pasan de ser meramente elaborados a producidos y donde las cadenas de producción se concentran en sustituir «la mano de obra por energía de combustión» [3].

Las prioridades en las fuentes de materia prima se desvían a partir de la era industrial hacia combustibles fósiles de gran rendimiento (petróleo, gas, carbón) (ver **Fig. 1**) y yacimientos minerales de difícil acceso, con elevados costes energéticos de extracción [4], cuya explotación posibilitaría grandes logros en el sector de la construcción. Así, en el último medio siglo, el consumo de combustibles fósiles ha aumentado alrededor de ocho veces su valor desde 1950 y aproximadamente dos veces desde 1980 hasta 2019 [5], al mismo tiempo que ha diversificado sus fuentes desde el carbón hacia una combinación con el petróleo y seguidamente con el gas.



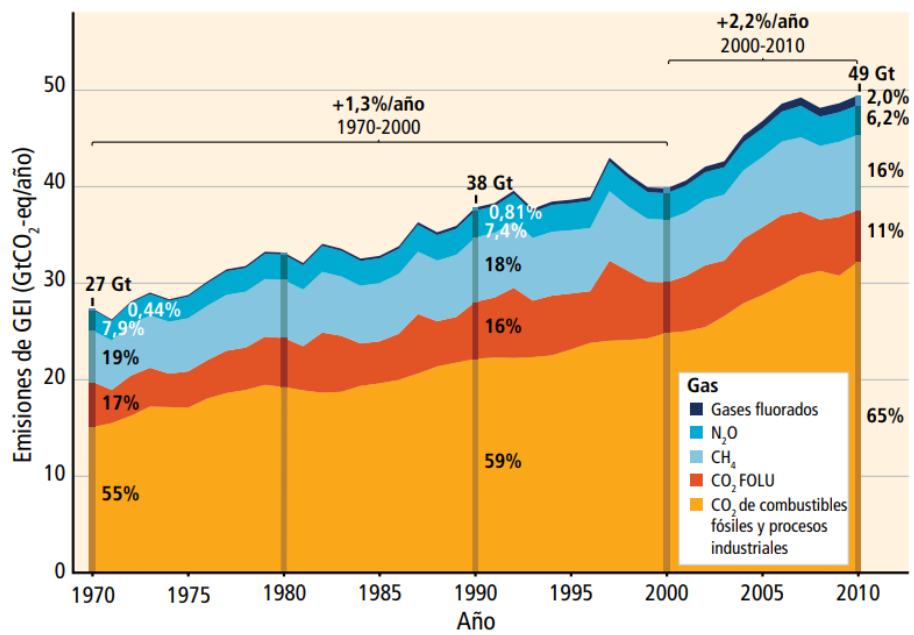
**Fig. 1.** Consumo global de energía primaria por fuentes de combustibles fósiles. Fuente: [6]

La actividad extractiva, y su papel en la construcción, ha afianzado una altísima dependencia energética de los combustibles fósiles —según la International Energy Agency (IEA) [7], en 2018 el 83.3% del suministro de energía primaria todavía se basaba en combustibles fósiles— y su agotamiento en la actualidad está abocando a una crisis energética de escala global [4,8]. Al mismo tiempo, estos cauces en los procesos industrializados de producción han terminado por liderar la fabricación de los materiales más extendidos en el sector de la edificación, con el subsiguiente impacto ambiental, consecuencia de una producción deslocalizada, un gran índice de elaboración, una elevada generación de deshechos no procesables por los ecosistemas y, como consecuencia, unos ciclos de producción abiertos crecientes [9].

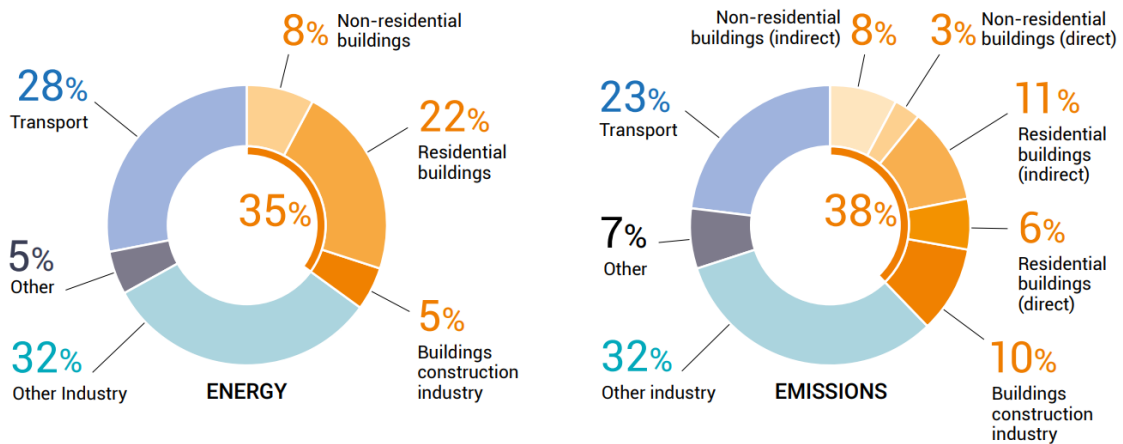
Esta especialización en los procesos industrializados de producción de materiales de construcción ha propiciado logros notables en materia de desarrollo económico y tecnológico, pero a costa de unos impactos ambientales ineludibles. Con ello, a lo largo del pasado siglo y el actual, la paulatina aceleración en crecimiento e intensidad de estos procesos de producción en todos los sectores ha llevado a un incremento anual en las emisiones antropógenas de gases de efecto invernadero registrado en un 1,3%/año entre 1970 y 2000, y en un 2,2%/año entre 2000 y 2010 [4] (ver **Fig. 2**).

En este marco, el sector de la construcción, en la actualidad, no sólo está consumiendo una gran parte de las materias primas naturales por encima de los niveles de biocapacidad de los territorios, sino que está siendo responsable de más de un tercio del total de emisiones de gases de efecto invernadero en la Unión Europea [10,11]. La Global Alliance for Buildings and Construction (GlobalABC) alerta de que, según los datos de la IEA [7], en 2019 las emisiones directas e indirectas de CO<sub>2</sub> en el sector de la edificación alcanzaron su nivel más alto con 10 GtCO<sub>2</sub>, es decir, aproximadamente un 28% de las emisiones totales. Estas emisiones indirectas incluyen las emisiones relativas a la generación de electricidad para el uso y funcionamiento de los edificios, cuyo consumo eléctrico supone cerca del 55% del consumo eléctrico global [11]. Si se consideran además las emisiones derivadas de la industria vinculada a aquellos procesos de producción de materiales de construcción antes comentados, este porcentaje de emisiones se eleva hasta el 38% [11] (ver **Fig. 3**).





**Fig. 2.** Emisiones antropógenas anuales totales de gases de efecto invernadero (GEI) (Gt CO<sub>2</sub>/año) para el período comprendido entre 1970 y 2010, por gases: CO<sub>2</sub> procedente de la quema de combustibles fósiles y procesos industriales; CO<sub>2</sub> procedente de la silvicultura y otros usos del suelo (FOLU); metano (CH<sub>4</sub>); óxido nítrico (N<sub>2</sub>O); gases fluorados abarcados en el Protocolo de Kyoto. Fuente: [4]

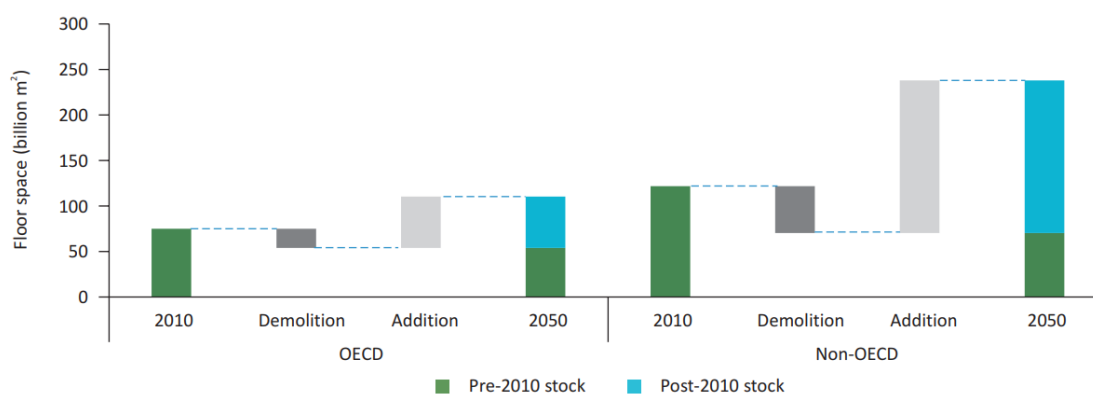


Notes: Buildings construction industry is the portion (estimated) of overall industry devoted to manufacturing building construction materials such as steel, cement and glass. Indirect emissions are emissions from power generation for electricity and commercial heat. Sources: (IEA 2020d; IEA 2020b). All rights reserved. Adapted from "IEA World Energy Statistics and Balances" and "Energy Technology Perspectives".

**Fig. 3.** Porcentajes de consumo de energía final y de emisiones de CO<sub>2</sub> en el sector de la edificación en el año 2019. Fuente: [11]

Esta incidencia del sector de la edificación en las emisiones anuales también es señalada por el Parlamento Europeo en la Directiva 2018/844 sobre el comportamiento energético de los edificios, donde se subraya la necesidad de desarrollar medidas efectivas no sólo para la descarbonización del parque edificado, sino también para la reducción de su

consumo de energía final, enfocadas a la transformación del parque existente en edificios de consumo de energía casi nulo (NZEB) [10]. La importancia de priorizar medidas de transformación y rehabilitación del parque existente se basan en la evolución prevista de los parques edificados en escenarios futuros por organizaciones internacionales como la IEA [12]. Estas previsiones (ver **Fig. 4**) señalan que, si bien los países no pertenecientes a la OCDE experimentarán un crecimiento muy elevado respecto al parque existente, más del 50% del parque actual de edificios a nivel global seguirá en pie en 2050, y más del 75% en los países miembros de la OCDE [12].



**Fig. 4.** Evolución del parque de edificios, medida en billones de m<sup>2</sup>, en los países pertenecientes y no pertenecientes a la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), entre 2010 y 2050. Fuente: [12]

En base a los diagnósticos, y apoyadas en los objetivos acordados como parte del Acuerdo de París de 2015 en la COP21 (21ª Conferencia de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático), estas medidas para la renovación del sector de la edificación hacia la descarbonización y la eficiencia energética deben referirse tanto a la dimensión constructiva del edificio (y a la industria de manufacturación vinculada), como al conjunto de sistemas y tecnologías para su operación y acondicionamiento, entre los que la Directiva destaca aquellos implementados para la calefacción y refrigeración de espacios [10]. Casi el 50% de la energía final de la Unión Europea es consumida por sistemas y tecnologías de calefacción y refrigeración, del cual un 80% se destina a edificios [10].

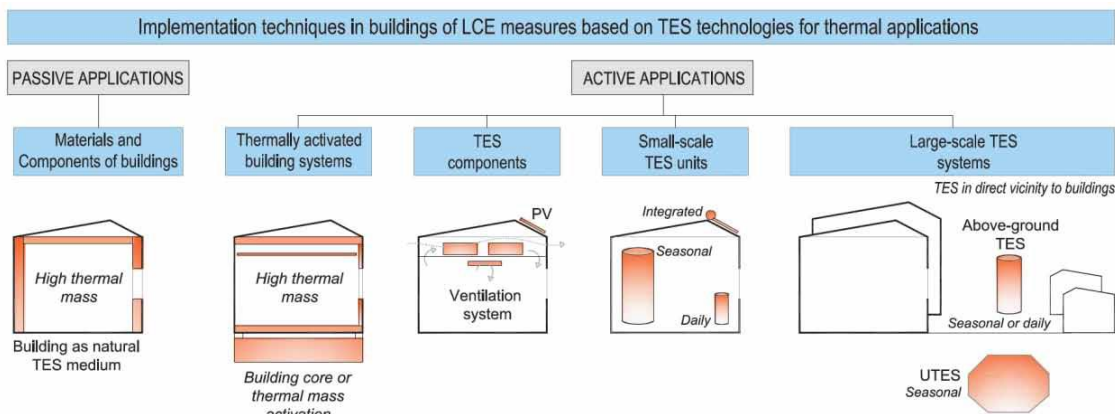
Entre los objetivos que podrían conducir a la descarbonización de los sistemas de calefacción y refrigeración, en su tesis doctoral, Lizana [13] destaca la reducción de la demanda energética y la implementación de tecnologías bajas en carbono más eficientes, junto al uso de fuentes de energía renovables, como objetivos primordiales en el camino hacia un sector de la edificación bajo en carbono.

Asimismo, tomando como referencia países como Suecia o Noruega, en los que el proceso hacia la descarbonización se encuentra a día de hoy considerablemente avanzado [14], Lizana destaca como solución más prometedora una combinación de edificios energéticamente eficientes y soluciones de almacenamiento de energía térmica, junto a la implementación de sistemas locales y renovables de calefacción y refrigeración, combinados con bombas de calor individuales, que permitan la descarbonización de la red eléctrica [13]. El Energy Storage Implementing Agreement, acordado y enmendado en 2020 por la IEA [15], destaca del mismo modo la importancia de la investigación y el

desarrollo de tecnologías de almacenamiento como el principal motor hacia un sistema energético renovable bajo en carbono.

Los materiales y tecnologías de almacenamiento de energía térmica (AET o *thermal energy storage*, TES) podrían optimizar el comportamiento energético de la edificación, implementados como estrategias de acondicionamiento pasivo basadas en los principios de la inercia térmica. Estas estrategias, aplicadas a pequeña escala como soluciones innovadoras de calefacción y refrigeración bajas en carbono, mejorarían el confort térmico al amortiguar las fluctuaciones en la temperatura interior (cargas pico), minorando así la demanda energética de los espacios y aumentando la eficiencia de los sistemas activos instalados con una menor potencia requerida; y reduciendo, por ende, el consumo de energía final [13,16]. En suma, las tecnologías de TES permiten una integración efectiva de fuentes de energía renovables al solventar los desfases entre los períodos de generación y de demanda de energía.

A pesar del vasto campo de investigaciones desarrolladas en los últimos años sobre materiales y tecnologías de almacenamiento de energía térmica [17] y su potencialidad para optimizar el comportamiento energético, la implementación en edificios de soluciones basadas en TES como medidas energéticas avanzadas bajas en carbono es aún muy reducida [13], dado el estado actual de desarrollo de las mismas, los costes de inversión y la falta de conocimientos para su integración arquitectónica [18,19]. Lizana [13] advierte que el estado actual de este campo se encuentra mayoritariamente en la fase de casos de demostración, donde los esfuerzos se concentran en los ensayos de comportamiento, eficiencia y viabilidad de soluciones avanzadas de TES, siendo aún necesarios amplios desarrollos técnicos y comerciales en aplicaciones factibles y competitivas en el sector de la edificación. Una clasificación de las técnicas de implementación en edificios de estas medidas energéticas basadas en tecnologías de TES, elaborada por Lizana [13], se presenta en la **Fig. 5**.



**Fig. 5.** Clasificación de las técnicas de implementación en edificios de medidas energéticas bajas en carbono basadas en tecnologías de TES. Fuente: [13]

Entre las técnicas de implementación, las aplicaciones pasivas mediante soluciones constructivas integradas con materiales de cambio de fase destacan por sus potenciales beneficios en el acondicionamiento de espacios interiores en la edificación [13,20,21]. Los materiales de cambio de fase (MCF o *phase change materials*, PCMs) constituyen

tecnologías de almacenamiento térmico latente, es decir, almacenan (y liberan) energía térmica como calor latente durante sus procesos reversibles de cambio de fase, intercambiando importantes cantidades de energía térmica con su entorno; lo cual caracteriza a estas tecnologías con una gran capacidad calorífica para unos rangos de temperatura relativamente pequeños y estables, correspondientes al cambio de fase del material [22].

Con una intensa actividad de investigación, estas tecnologías se destacan como la técnica con mayor potencial a corto y largo plazo para aplicaciones en la edificación, situándose actualmente en una fase de investigación basada, según refiere Lizana [13], en unidades piloto, prototipos pre-comerciales y/o productos.

Las relativamente recientes aplicaciones pasivas de refrigeración mediante la integración de materiales de cambio de fase en soluciones de muros, techos o suelos [13,23] operan absorbiendo las ganancias de calor durante el día (carga mediante un cambio de fase por las altas temperaturas), reduciendo los picos de temperatura operativa interior; y liberando el calor almacenado durante la noche (descarga mediante otro cambio de fase por el descenso de las temperaturas), completando así el ciclo de regeneración del PCM (carga/descarga) y preparándolo para un nuevo proceso de almacenamiento térmico durante el día siguiente.

No obstante, estos modos de operación también se reconocen en materiales y tecnologías de almacenamiento de energía térmica menos recientes, característicos de la arquitectura vernácula desde la antigüedad. Entre ellas, las construcciones en tierra forman parte no sólo de las primeras prácticas constructivas, sino de las primeras tecnologías de almacenamiento térmico sensible para espacios habitados (ver **Fig. 6**). Las propiedades físico-químicas y térmicas de los componentes arcillosos de esta materia prima han proporcionado cuantiosas mejoras en el comportamiento energético de los edificios a lo largo de la historia; almacenando (y liberando) calor, con la variación de su temperatura, siguiendo patrones únicos para cada material arcilloso [24], caracterizado por su composición mineralógica, su densidad, su conductividad térmica, su estructura interna, su humedad y su capacidad calorífica específica, entre otros [21,22,25]. Las antiguas soluciones constructivas de adobe en los acantilados del suroeste de los Estados Unidos se estima que llegaban a reducir los cambios de temperatura diurna en un 20-50%, a pesar de encontrarse abiertas al aire exterior [24].

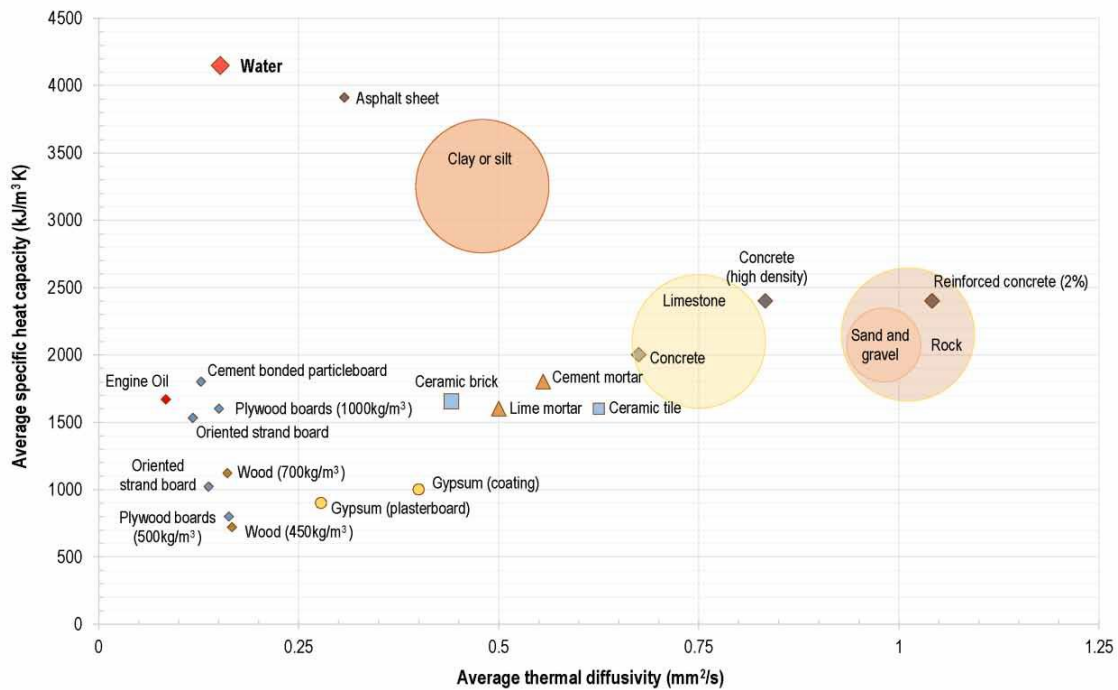


Fig. 6. Relación de los principales materiales en el almacenamiento de energía térmica sensible para aplicaciones en edificación. Fuente: [13]

En este marco, se detectan unos intereses crecientes por la revisión de las prestaciones y los métodos de caracterización y diseño de soluciones constructivas basadas en arcilla como tecnologías avanzadas de almacenamiento de energía térmica. Su potencialidad en el desarrollo de medidas energéticas bajas en carbono en el sector de la edificación no sólo se manifiesta en su elevada capacidad calorífica, junto a su baja energía incorporada; sino también en el análisis combinado de esta alta inercia térmica con su comportamiento higratérmico y con otras propiedades físico-químicas, como su espacio interlamilar, su área superficial o su estructura porosa, entre otras [21,22,25]. No obstante, actualmente el desarrollo de las líneas de investigación sobre soluciones constructivas híbridas y materiales compuestos basados en arcilla que incorporen además materiales de cambio de fase resulta ser aún muy exiguo, si bien en la hibridación de sus prestaciones físico-térmicas podrían ofrecer un amplio rango de oportunidades y beneficios para optimizar el comportamiento energético de los edificios como tecnologías innovadoras basadas en TES para el acondicionamiento pasivo de espacios interiores.



## 2. Objetivos

El objetivo principal de la presente investigación lo constituye el desarrollo de soluciones constructivas a base de arcilla estabilizada con aditivos naturales, combinada con materiales de cambio de fase, como tecnología innovadora de almacenamiento de energía térmica para su aplicación pasiva en el acondicionamiento de espacios interiores en la edificación, con el fin de reducir la demanda energética de los mismos, mejorando tanto la eficiencia energética del edificio como las condiciones de confort y habitabilidad.

Con ello, se aspira a aportar y ampliar las líneas de investigación y el campo de tecnologías para el acondicionamiento pasivo de espacios a través de materiales prometedores para el almacenamiento de energía térmica en edificación, concretamente de la arcilla y los materiales de cambio de fase (PCMs). A tal fin, se investigan, determinan y evalúan las prestaciones y los criterios de diseño e implementación de una propuesta de solución constructiva arcilla-PCM mediante la consecución de una serie de objetivos específicos:

- (1) Identificación y caracterización de soluciones existentes basadas en arcilla, así como procesos de fabricación y estabilización, y su desarrollo y potencialidad como tecnologías avanzadas de almacenamiento térmico sensible dentro de las estrategias de acondicionamiento pasivo en la arquitectura vernácula y bioclimática.
- (2) Definición y clasificación de las tecnologías de almacenamiento térmico latente basadas en materiales de cambio de fase, junto a los procesos existentes de integración en soluciones constructivas de aplicación en edificación, así como las líneas de investigación abiertas en su interacción y combinación con soluciones constructivas basadas en arcilla.
- (3) Determinación de las propiedades físicas y térmicas de un prototipo de solución de panel compuesto a base de arcilla estabilizada y PCM microencapsulado, siguiendo procesos de caracterización físico-térmica por metodología experimental y cálculo numérico.
- (4) Evaluación de la competitividad del prototipo de panel arcilla-PCM mediante la revisión sistemática y el análisis comparativo de sus prestaciones con soluciones constructivas convencionales, soluciones basadas en PCM microencapsulado actualmente comercializadas y soluciones innovadoras presentadas en literatura.
- (5) Evaluación del comportamiento térmico del prototipo de panel arcilla-PCM en edificación mediante la simulación numérica de alternativas de implementación del mismo en un caso de estudio, empleando indicadores basados en períodos de confort para la identificación de variables y parámetros clave en la aplicación pasiva de estas soluciones para el acondicionamiento de espacios interiores.
- (6) Identificación de potenciales de mejora y criterios hacia la optimización del diseño e implementación de soluciones constructivas basadas en arcilla y PCM para su aplicación en la edificación.





### 3. Metodología de investigación

Para la consecución de estos objetivos, se desarrolla una metodología de investigación estructurada en cuatro fases, las cuales se detallan a continuación.

**Fase 1.** En primer lugar, a partir de la revisión de la literatura científica, se desarrolla un estado del conocimiento sobre las líneas de investigación y el campo de tecnologías relativos al presente trabajo. Para ello, se estudian, por un lado, las soluciones basadas en arcilla, abarcando desde el carácter mineralógico y el origen geológico de los minerales arcillosos hasta su papel como materia prima en las técnicas y soluciones constructivas tradicionales de tierra, concluyendo un análisis de las soluciones avanzadas de construcción en tierra desarrolladas actualmente. Por otro lado, se lleva a cabo una revisión de las estrategias de acondicionamiento pasivo en la arquitectura vernácula, así como de sus pilares para el aprovechamiento de la energía, y, seguidamente, de los métodos y sistemas de almacenamiento de energía térmica, incluyendo las aplicaciones y técnicas de implementación en edificación de los mismos. Por último, se concluye el estado del conocimiento con una revisión de las líneas de desarrollo abiertas sobre soluciones basadas en arcilla que integren materiales de cambio de fase en su propuesta como tecnologías avanzadas de almacenamiento de energía térmica para su aplicación en la edificación.

**Fase 2.** En segundo lugar, una vez estudiado el marco de este campo de tecnologías y materiales prometedores para la mejora del comportamiento térmico de los edificios, se procede a la presentación y determinación de las propiedades físico-térmicas de una propuesta de solución constructiva arcilla-PCM. Para ello, se seleccionan como materiales constituyentes de la solución unas arcillas estabilizadas con aditivos naturales y una solución comercializada de material de cambio de fase (PCM) microencapsulado.

Seguidamente, se lleva a cabo, por un lado, la caracterización térmica de las arcillas seleccionadas, mediante una serie de ensayos de calorimetría diferencial de barrido (DSC), desarrollados entre el Instituto de Ciencia de Materiales de Sevilla (ICMSE) y el servicio de caracterización funcional de los Servicios Generales de Investigación de la Universidad de Sevilla (CITIUS). Para esta caracterización experimental, se preparan y analizan tres muestras para cada tipo de arcilla (SR, SY, SB). Los resultados de la caracterización térmica experimental de las arcillas se emplean, asimismo, para determinar la capacidad de almacenamiento térmico de las mismas, siguiendo para ello métodos de cálculo numérico. Por otro lado, se lleva a cabo la caracterización térmica del PCM microencapsulado seleccionado, siguiendo igualmente métodos de cálculo numérico, a

partir de la información proporcionada en la documentación técnica del producto. Finalmente, se caracteriza mediante cálculo numérico la solución de panel arcilla-PCM propuesto, desarrollándose para su caracterización y evaluación térmica tres variantes del prototipo de panel, en función de la fracción de masa (% m/m) de PCM microencapsulado integrada en el compuesto.

**Fase 3.** En tercer lugar, en base a los resultados de esta caracterización, se desarrolla un análisis comparativo del prototipo de panel arcilla-PCM con otras soluciones constructivas, siguiendo para ello una revisión sistemática, por un lado, de aquella literatura publicada en la que se diseñen y estudien soluciones innovadoras basadas en PCM microencapsulado, bajo algún parámetro comparable con la solución de panel arcilla-PCM, y, por otro, de documentación técnica proporcionada por fabricantes de soluciones basadas en PCM microencapsulado actualmente comercializadas. Adicionalmente, se compara el panel arcilla-PCM con una serie de soluciones constructivas convencionales caracterizadas en las referencias. Esta revisión no sólo persigue hacer una aproximación crítica a la competitividad del prototipo desarrollado dentro de su respectivo campo de investigación y fabricación, sino también, desde un punto de vista más amplio, intentar detectar en los resultados aportados por otros equipos investigadores potenciales de mejora y parámetros clave para optimizar el diseño, implementación y comportamiento de la solución.

**Fase 4.** En cuarto lugar, una vez caracterizada la solución constructiva basada en arcilla y PCM, se lleva a cabo un análisis paramétrico de las estrategias de implementación de la misma en edificación, siguiendo para ello la metodología desarrollada en las referencias para la evaluación de alternativas basadas en PCM a través de su simulación numérica. Así, esta fase se estructura en tres etapas.

En una primera etapa, se presentan y caracterizan el caso de estudio seleccionado para la simulación como escenario base, y los escenarios definidos para la evaluación de las alternativas de implementación del panel arcilla-PCM.

En una segunda etapa, se lleva a cabo el modelado numérico para la simulación de los escenarios empleando para ello el software de simulación dinámica de sistemas energéticos TRNSYS v18. El modelado numérico del caso de estudio se subdivide, a su vez, en cinco apartados: (1) el modelado del caso de estudio (incluyendo geometría, caracterización constructiva, horarios de ocupación, índices de infiltración y ventilación, y las ganancias/pérdidas internas); (2) la calibración y validación del modelo según los índices de incertidumbre del manual ASHRAE Guideline, a partir de los datos obtenidos con las mediciones realizadas en el interior del aula en el período simulado (junio de 2020); (3) la capa de panel arcilla-PCM que se implementará en el modelo de simulación; (4) los modos de operación; y (5) los indicadores de comportamiento del modelo numérico, definidos por el porcentaje de horas de discomfort severo (DH), y el porcentaje de horas de discomfort ( $DH_{acm}$ ), considerando el rango de discomfort del modelo de confort térmico adaptativo establecido en la normativa UNE-EN 16798-1:2020.

En una tercera y última etapa, se analizan los resultados de la simulación de los escenarios, distinguiéndose para ello tres apartados de análisis. En un primer apartado, se evalúa el comportamiento energético del escenario base, así como los parámetros determinantes en el diseño e implementación de la capa de panel arcilla-PCM. Estos parámetros son

incluidos en el análisis de sensibilidad del siguiente apartado: la temperatura de fusión ( $^{\circ}\text{C}$ ), así como el área de ventana abierta ( $\text{m}^2$ ) y el índice de renovaciones/hora durante la ventilación nocturna. En el segundo apartado, se recogen los resultados del análisis paramétrico de los dos escenarios alternativos, discutiendo en cada caso las opciones más pertinentes para la optimización en el diseño e implementación del panel arcilla-PCM. En el tercer apartado, se presenta y discute el comportamiento final de las soluciones, una vez optimizadas para cada uno de los escenarios en base a la fase anterior, determinando parámetros y criterios óptimos en el diseño, implementación y comportamiento del prototipo de panel arcilla-PCM como tecnología avanzada de almacenamiento de energía térmica para el acondicionamiento pasivo de espacios interiores.



## 4. Estado del conocimiento

### 4.1. Soluciones basadas en arcilla para edificación

#### 4.1.1. Introducción

Dentro de la gran narrativa sobre arquitectura vernácula, en las evocaciones a construcciones de tapia que Herodoto (s. V a.C.) refleja en sus *Historias* durante sus viajes por los continentes, Guillaud [26] reconoce la primera huella literaria de unas técnicas de mayor antigüedad que formarían parte de las primeras prácticas constructivas de cobijo: la construcción con tierra. Esta materia prima, y las soluciones constructivas que han derivado de su utilización, deben a la presencia en su composición de minerales arcillosos todo un abanico de propiedades físico-químicas y térmicas únicas en el campo de los materiales [27] que se estudiarán en el presente capítulo. De ahí que se advierta, a lo largo de los siglos, un camino continuo en la investigación sobre construcción con tierra, la cual se puede registrar en la edificación de construcciones en el ámbito rural; construcciones auxiliares de menor escala; y construcciones de mayor magnitud, desde estructuras militares, murallas y torres vigía, hasta construcciones palatinas de singular calidad constructiva, sin olvidar los conjuntos urbanos históricos, entre los que se encuentra el complejo de la Alhambra de Granada, las ciudades imperiales marroquíes, como Meknès o Fez, o los *tulou*, construcciones propias de la región china de Fujian [26,28].



**Fig. 7.** Edificación mediante técnica de construcción por moldeado de muro monolítico de tierra apisonada (tapia) en Villanueva de los Caballeros, Valladolid (España). Fuente: [29]

En la actualidad, la base bibliográfica a nivel nacional e internacional sobre construcción en tierra presenta una extensión prácticamente inabarcable. Se destaca a nivel internacional la labor de investigación, promoción y difusión de la construcción en tierra de la Escuela Nacional Superior de Arquitectura de Grenoble (Francia), concretamente de su Centro de Investigación CRAterre, dirigido por el arquitecto y profesor Hubert Guillaud [26]. La Cátedra UNESCO Arquitectura de Tierra, Culturas Constructivas y Desarrollo Sostenible, creada e integrada en este centro en 1998, cuenta en la actualidad con 41 socios en 26 países de 4 continentes, entre los que se encuentran desde 2012 los catedráticos Camilla Mileto y Fernando Vegas de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Valencia (UPV) [30].

Dentro de esta amplia red de colaboración con investigadores e instituciones a nivel nacional e internacional, se aprecia notablemente desde mediados del siglo XX la labor de cooperación en proyectos de experimentación y reinterpretación de técnicas y soluciones tradicionales de la construcción con tierra, que permitan reintegrar tales prestaciones de los minerales arcillosos en el seno de los compromisos y problemáticas que contrae y afronta la arquitectura hasta la actualidad [31,32]; abarcando desde la conservación y recuperación de arquitectura vernácula hasta la rehabilitación energética eficiente de la edificación existente, a fin de orientar las acciones y decisiones en el sector de la construcción hacia medidas energéticas bajas en carbono.

Para comprender la potencialidad de estas soluciones, se estaría precisando una mayor aproximación a esta materia prima –la tierra–, ubicada en toda la superficie de la litosfera (ver **Fig. 8**) y soporte del desarrollo de la biosfera. Su composición se deriva de la combinación de tres componentes: sólidos, líquidos y gases, donde los dos últimos colmatan huecos y poros de la estructura conformada por los primeros [29]. Entre sus componentes sólidos, la fracción constituida por los minerales arcillosos, según señala en su tesis Gómez-Patrocinio [29], determina su capacidad para adquirir resistencia seca; y, junto a la fracción de arenas gruesas, también determina el comportamiento del material, según Vargas [33]. La particularidad del papel que desempeñan en la tierra las arcillas, «el único componente activo» de este material constructivo [29], se basa en su carácter mineralógico, que no sólo les permite aglomerar o conferir cohesión al material, sino también actuar como agente transformador en presencia de soluciones acuosas [27]. La investigación sobre sus potenciales aportaciones de aplicación en soluciones constructivas avanzadas exige, pues, de una comprensión más detallada del carácter mineralógico de estos minerales arcillosos y, con ello, de su origen geológico.

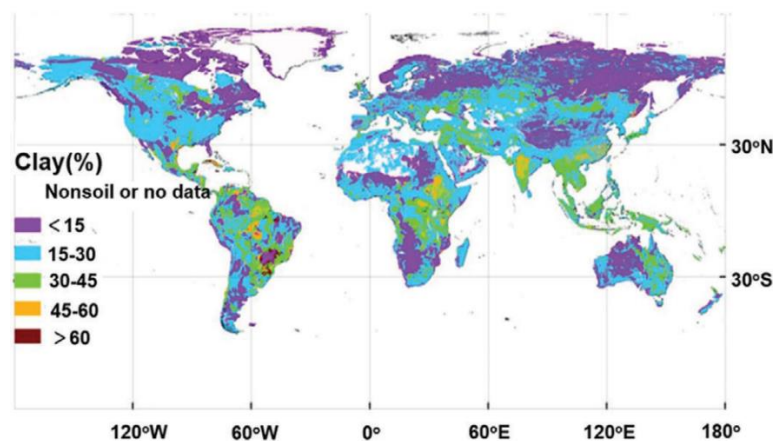


Fig. 8. Distribución global de los contenidos de arcilla en la superficie de la litosfera. Fuente: [34]

#### 4.1.2. Carácter mineralógico de las arcillas

##### 4.1.2.1. Arcillas: agentes transformadores

Las arcillas constituyen la fracción de componentes minerales con un diámetro de partícula más pequeño en los materiales de tierra; más concretamente, se refieren a aquellos minerales con un diámetro de partícula inferior a  $2\ \mu\text{m}$  ( $0.002\ \text{mm}$ ) [29]. Esta delimitación se corresponde con la definición de *mineral arcilloso* utilizada desde el siglo XIX, la cual se presenta para referirse a aquellos minerales cristalinos y submicroscópicos (esto es, fuera del alcance de la resolución del microscopio óptico) que pudieron ser observados, pero no identificados de una manera sistemática, del modo en que se habían caracterizado otros minerales con mayor diámetro de partícula [27]. Si bien durante este siglo se pudieron realizar análisis químicos de algunos de estos minerales con buenos resultados, apenas se pudo comprender la estructura cristalina y la familia mineralógica de tales minerales; consecuencia principalmente de las impurezas presentes en los agregados de arcilla [27]. La llegada del difractómetro de rayos X, y de los patrones de difracción de muestras cristalinas, en el siglo XX permitió la identificación de las estructuras cristalinas y, con ello, la distinción entre las diferentes especies de minerales con un diámetro de partícula inferior a  $2\ \mu\text{m}$  [27], incluidas en un primer momento dentro de los *minerales arcillosos*.

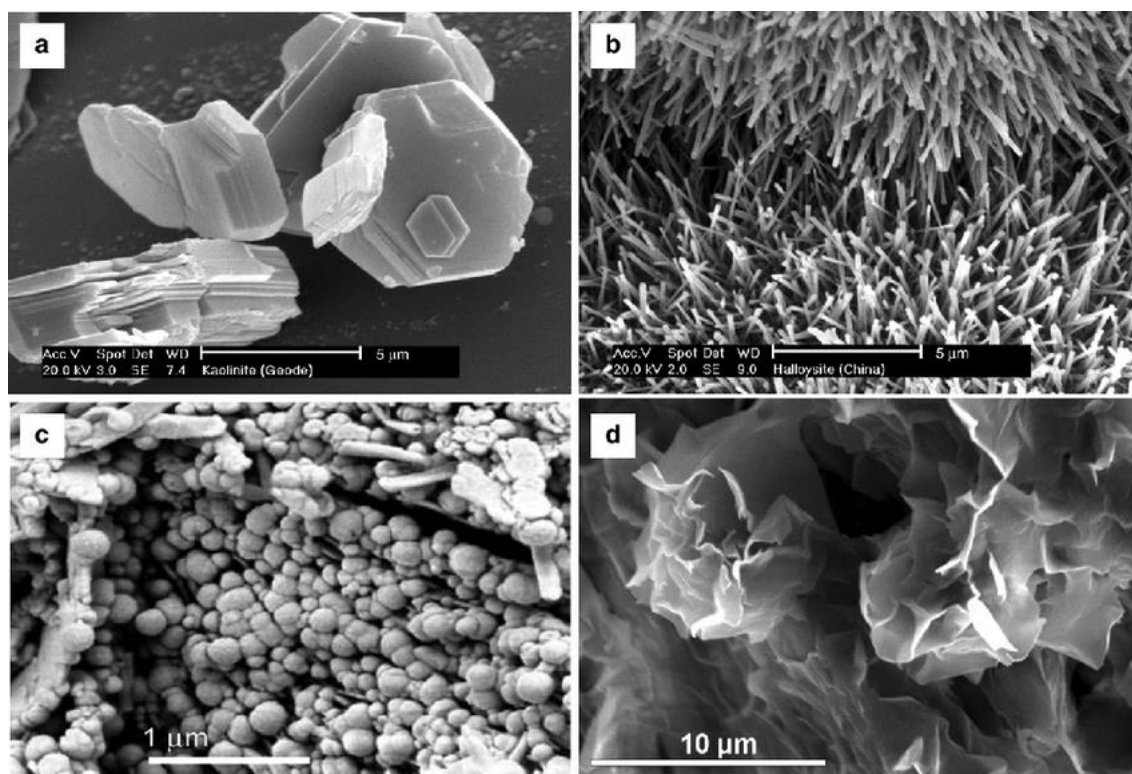
En este contexto, dos observaciones permitieron corroborar la particularidad de estos minerales y la importancia de su interacción con materiales de tierra y con toda la biosfera. Por un lado, las propiedades de las arcillas en sus interacciones se encuentran dominadas por sus propiedades de superficie: con un área de superficie excepcional, los minerales arcillosos atraen sustancias químicas (iones o moléculas) a sus superficies (o también a su estructura interna), convirtiéndose en agentes transformadores o de transferencia [27]. Por otro lado, y como consecuencia, las arcillas son, al mismo tiempo, química y físicamente activas [27,29]. Su estructura química interna se corresponde con unas características de reacción química muy singulares. De no contar con esta carga eléctrica, los minerales arcillosos presentarían un comportamiento mucho más similar a otros tipos de minerales del mismo tamaño y forma [27].

En base al trabajo de investigación de Guillaud et al. [27], se lleva a cabo una breve revisión de algunas de las características físico-químicas más críticas de los minerales arcillosos en su interacción con materiales de tierra.

##### 4.1.2.2. Formas de partícula de los minerales arcillosos

Si bien existen irregularidades, de manera general, según la relación de sus tres dimensiones (ancho, largo, altura) respecto a las tres direcciones del espacio, Guillaud et al. [27] distinguen los siguientes grupos de forma de partícula en los minerales arcillosos:

- Forma escamosa: presenta la misma dimensión en dos direcciones y un espesor de  $1/20$  en la otra dirección.
- Forma tubular en listón: de aspecto lineal, el ancho es la dimensión predominante, siendo el largo muy inferior a ésta, y la altura, siempre inferior a las dos anteriores.
- Forma tubular en aguja: de aspecto lineal, dos de las dimensiones son muy similares, siendo la tercera muy superior a ellas.
- Forma hexagonal: la forma escamosa presenta una forma regular definida.



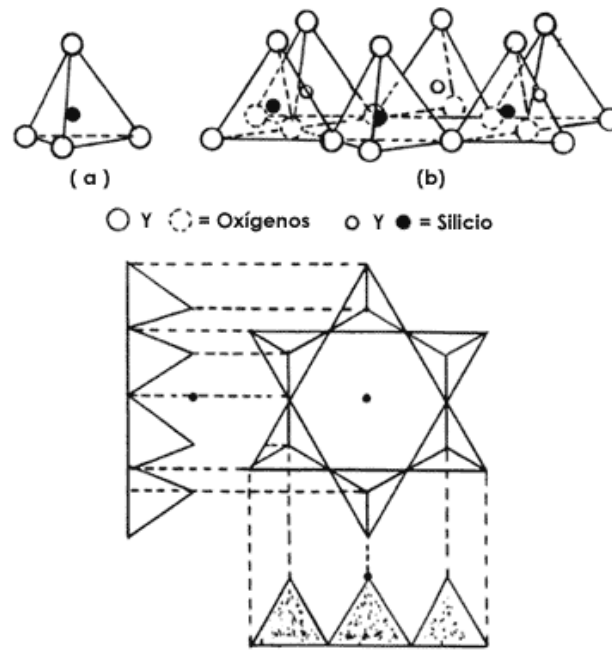
**Fig. 9.** Imágenes por microscopía electrónica de barrido (SEM) de minerales arcillosos: (a) cristales pseudo-hexagonales de caolinita; (b) cristales tubulares en aguja de halloysita; (c) cristales esferoidales de halloysita; y (d) cristales escamosos de montmorillonita. Fuente: [35]

#### 4.1.2.3. Estructura cristalográfica

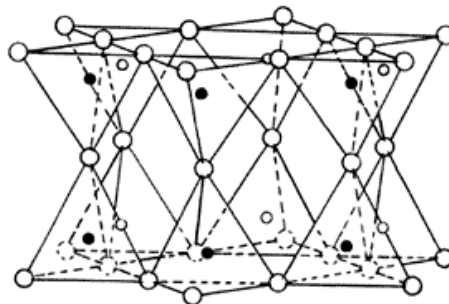
Las arcillas están constituidas por agregados de silicatos, los cuales se componen, a su vez, de silicio y oxígeno. Se caracterizan por la presencia de una unidad estructural básica, que se representa de manera idealizada en forma de tetraedro, el cual dispone de cuatro átomos de oxígeno y un átomo de silicio, rodeado este último por los cuatro anteriores (ver **Fig. 10**). Dado que, en los silicatos, la valencia de los átomos de silicio y de oxígeno es  $4^+$  y  $2^-$ , respectivamente; cada unidad estructural (tetraédrica) cuenta con cuatro cargas negativas:  $[\text{SiO}_4]^{4-}$ . La forma de combinación de las unidades básicas entre sí y con otras partículas configura las seis subclases de silicatos existentes. Las unidades se enlazan (coordinan) formando hojas y las hojas, a su vez, se unen apiladas formando capas o láminas (ver **Fig. 11**). Cabe aclarar que los poliedros de las figuras incluidas en este subapartado formalmente no existen en la realidad y constituyen una idealización para facilitar la comprensión de las estructuras.

La subclase a la que pertenecen las arcillas se denomina filosilicatos ya que sus combinaciones y enlaces más comunes caracterizan al mineral con una estructura cristalográfica hojosa o laminar (esto es, en forma de hoja), donde la relación del espesor respecto a la mayor dimensión es aproximadamente de  $1/20$ . Esto significa que presentan un área de superficie superior a la mayoría de minerales con el mismo tamaño de partícula. La causa de esta estructura hojosa se encuentra en la dirección de enlace de sus átomos constituyentes, donde las fuerzas de enlace importantes tienen lugar en una matriz bidimensional.





**Fig. 10.** Representación gráfica de (a) unidad estructural básica (tetraedro); y (b) una hoja de seis tetraedros formando una matriz bidimensional. Fuente: [36]



**Fig. 11.** Representación gráfica de una lámina formada por dos hojas tetraédricas. Fuente: [36]

#### 4.1.2.4. Enlaces covalentes entre hojas

No obstante, existe otra configuración de coordinación de los átomos de la unidad estructural básica en la que los átomos de silicio disponen de seis átomos de oxígeno en torno a ellos, resultando un polígono octaédrico (ver **Fig. 12**). La estructura de todos los filosilicatos se puede entender a partir de la combinación de hojas tetraédricas y octaédricas. La **Fig. 10** mostraba cómo la disposición de los tetraedros coordinados en una hoja (hoja tetraédrica) es tal que en su centro se genera una oquedad o cavidad hexagonal, en la cual se ubican grupos hidróxidos (OH), compuestos de un átomo de oxígeno y uno de hidrógeno, los cuales permiten enlazar la hoja tetraédrica con hojas octaédricas de mayor complejidad geométrica (ver **Fig. 13**).

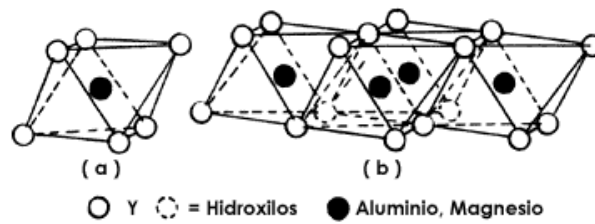


Fig. 12. Representación gráfica de (a) unidad estructural de octaedro; y (b) una hoja de cuatro octaedros. Fuente: [36]

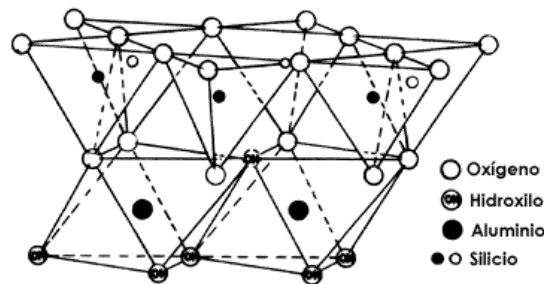


Fig. 13. Representación gráfica de una lámina formada por una hoja tetraédrica y una hoja octaédrica unidas por enlaces covalentes. Fuente: [36]

Tanto en la hoja tetraédrica como en la hoja octaédrica, todos los enlaces establecidos entre los átomos de oxígeno, los grupos hidróxidos (OH) y los átomos de silicio o aluminio, son enlaces covalentes, lo que significa que: presentan enlaces energicamente muy fuertes; no pueden ser rotos con facilidad ya que se genera un estado más estable que el previo al enlace; y para deshacerlos se precisa suministrar elevadas cantidades de energía, lo que define a los minerales arcillosos como minerales excepcionalmente estables bajo condiciones ambientales.

#### 4.1.2.5. Agua estructural

Por tanto, los átomos de hidrogeno se encuentran (1) presentes en todos los minerales arcillosos, (2) asociados con átomos de oxígeno, (3) en lugares específicos de la estructura del mineral, a saber, donde se encuentran coordinados octaédricamente (ver **Fig. 13**), y (4) fuertemente retenidos en la estructura (enlaces covalentes). De ahí que a los grupos hidróxidos (OH) presentes en la estructura de los filosilicatos se les denomine «agua estructural» [36], la cual sólo puede ser movilizadada si el mineral se calienta a temperaturas muy elevadas, para las cuales la arcilla cede el hidrogeno en forma de agua junto a los oxígenos de la estructura. Se comprende así por qué la estructura laminar de las arcillas puede retener el pequeño porcentaje de humedad necesario para mantenerse unidas y dotar al material de cohesión en estado seco.

Cuando esta agua es expulsada de la estructura de la arcilla, ésta pierde su forma, se vuelve amorfa y se desestabiliza transformándose en otro mineral. Este proceso de calentamiento y transformación de las estructuras de los minerales arcillosos se encuentra en la base de la fabricación de materiales cerámicos a base de arcilla, para los que se han de aplicar temperaturas de cientos de grados centígrados durante varias horas. La

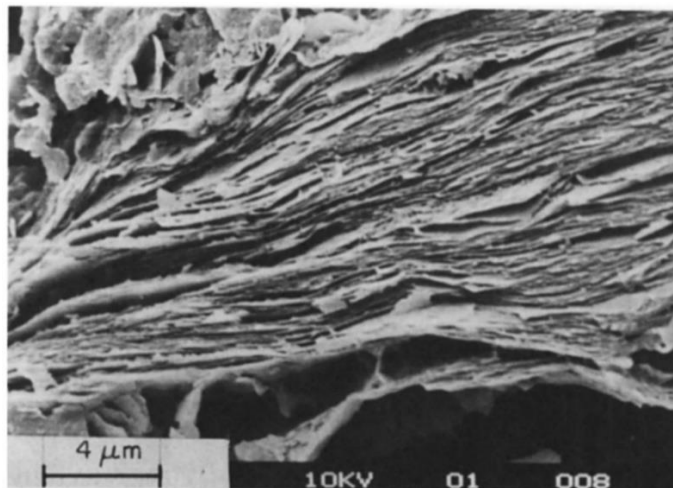
temperatura a la cual el agua estructural es expulsada por la estructura de las arcillas puede ser empleada para identificar a los minerales arcillosos.

#### 4.1.3. Origen geológico de las arcillas

El carácter mineralógico de los minerales arcillosos parte de un origen geológico basado en la meteorización de las rocas (minerales de silicato) en su interacción con la hidrosfera, la atmósfera y la biosfera. Los procesos de disolución y recristalización que tienen lugar en este encuentro son los mismos procesos de origen y transformación de los minerales arcillosos.

La dureza y compactación que caracteriza a las rocas se debe, entre otros, a los procesos de compresión que experimentan por la acumulación de sedimentos, a los cuales se suma el aumento de las temperaturas que acompaña al hundimiento bajo la superficie terrestre. No obstante, cuando los minerales sólidos de estas rocas son descubiertos de su hábitat natural (altas presiones y temperaturas), estos minerales se vuelven inestables bajo los efectos de la meteorización, donde destaca la interacción con soluciones acuosas. La proporción de solución acuosa respecto a la de minerales sólidos que interactúan determina el índice de reacción, el tipo de reacción química y, por último, el tipo de estructura cristalográfica y de mineral segregado.

Los estados iniciales de alteración, y la disolución del material rocoso que sigue, constituyen el primer paso de la mayoría de las interacciones agua-roca. Cuanto mayor sea la renovación del aporte de agua (precipitación o circulación de fluidos), más inestables se vuelven los minerales sólidos de las rocas y, por tanto, más dominadas se ven las reacciones por la disolución incongruente, en la que ciertos elementos entran en la solución (silicio, aluminio, hidrógeno, hierro, magnesio, entre otros) y se produce una recristalización de las estructuras [37]. La meteorización química de estos minerales primarios menos estables conduce, entre otros, a la formación de minerales arcillosos. Las micas y cloritas presentes en rocas ígneas y metamórficas, por ejemplo, requieren relativamente pocos cambios estructurales para convertirse en minerales arcillosos [37]. La **Fig. 14** muestra los efectos de la meteorización y, consecuentemente, de disolución y separación de capas en minerales de mica.



**Fig. 14.** Imagen por microscopía electrónica de barrido (SEM) de la meteorización de micas. Fuente: [37]

Los minerales arcillosos resultantes de estos procesos se encuentran hidratados, con el consecuente incremento de volumen, y tienen una estructura muy particular, que difiere de la de los minerales preexistentes en las rocas que han interactuado. Como consecuencia de las oquedades que se producen durante los procesos de alteración y disolución, la formación de arcillas resulta en un agregado con una densidad inferior a la de la roca inicial, presentando estructuras y potenciales propiedades de superficie ya analizadas en el subapartado anterior.

#### 4.1.4. Técnicas y soluciones constructivas basadas en arcilla

El *Traité de construction en terre* [38], presentado en 2006 por Hubert Guillaud y Hugo Houben por el Centro de Investigación CRAterre, identifica doce soluciones constructivas con arcilla, agrupándolas, además, en tres grupos de técnicas de construcción con tierra. Para la clasificación recogida en esta investigación, se siguen los matices introducidos a este tratado por la estructura de caracterización de técnicas constructivas en tierra que Gómez-Patrocínio [29] presenta en su tesis sobre la arquitectura tradicional de tierra en España.

Así, en base al trabajo de investigación en [29], se presenta a continuación una caracterización de las soluciones constructivas basadas en arcilla, distinguiendo para ello los grupos que siguen (ver **Tabla 1**): muros monolíticos; muros de fábrica; muros mixtos, que abarca entramados con relleno de tierra y paredes tejidas; y recubrimientos y acabados. Adicionalmente, siguiendo el Catálogo de Soluciones Cerámicas, editado por Hispalyt [39], se recogen brevemente aquellas soluciones basadas en arcilla cocida que engloban la construcción de muros de fábrica mediante técnicas de aparejo de piezas cerámicas. Por último, se lleva a cabo una revisión de las líneas abiertas de investigación y desarrollo de soluciones constructivas avanzadas basadas en arcilla, destacando en estas líneas los procesos de prefabricación y la experimentación y fabricación mediante técnicas de estabilización y de refuerzo de soluciones tradicionales a fin de mejorar las prestaciones de su aplicación final en edificación.

**Tabla 1.** Principales soluciones constructivas basadas en arcilla registradas a nivel nacional. Fuente: [29]

<b>Grupo de técnicas constructivas</b>	<b>Tipo de solución</b>
<b>Muros monolíticos</b>	Soluciones excavadas
	Soluciones de tierra apisonada (tapia)
	Soluciones de tierra vertida
	Soluciones de tierra apilada
	Soluciones de tierra modelada
<b>Muros de fábrica</b>	Soluciones de fábrica de adobes
	Soluciones de fábrica de elementos cortados directamente del terreno
	Soluciones de fábrica de adobes manuales
	Bloques de tierra comprimida (BTC)
<b>Muros mixtos</b>	Entramados de relleno de tierra
	Paredes tejidas
<b>Recubrimientos y acabados</b>	

#### 4.1.4.1. Soluciones constructivas basadas en arcilla

##### 4.1.4.1.1. Muros monolíticos

Este grupo de técnicas se caracterizan por generar soluciones constructivas unitarias, masivas y homogéneas, presentando un número de juntas nulo o muy reducido respecto a las dimensiones de la solución ejecutada. Gómez-Patrocínio [29] reconoce en la arquitectura tradicional española dos soluciones constructivas principales que responden a estas técnicas: las soluciones excavadas y las soluciones de tierra apisonada (tapia). Por un lado, las soluciones excavadas se generan siguiendo técnicas de sustracción de material en un suelo con las condiciones adecuadas, dando lugar a espacios excavados de hábitat. Por otro lado, las soluciones de tierra apisonada se generan mediante técnicas de vertido y compactación de tongadas de tierra dentro de un encofrado específico, denominado tapial [28,29].

Gómez-Patrocínio [29] hace mención a la tapia como la solución constructiva más difundida de la península. Por su parte, Guillaud [26] destaca la recurrencia en el desarrollo de esta técnica en épocas y latitudes muy diversas a lo largo de la historia, dando lugar a un legado excepcional del patrimonio vernáculo de culturas regionales en países como Marruecos, Argelia, Perú, China (ver **Fig. 15**), España, Portugal y Francia. El término de *tapia*, del árabe *tabîya*, designó las técnicas de compactación de tierra en el contexto ibérico durante la época de Al-Andalus, «desde los territorios del Magreb a Andalucía, hasta en Extremadura» [26], para después, con el paso de los siglos, extenderse por los territorios septentrionales de la península, los cuales hoy presentan un vasto patrimonio rural en tapia (ver **Fig. 15**).



**Fig. 15.** Construcciones mediante solución constructiva de muro monolítico de tierra apisonada (tapia). A la izquierda: Obra en Pueblo de Maanqiao (Condado de Huili, Sichuan, China). Mu Jun. Fuente: [26]. A la derecha: Construcción en Barcial de la Loma, Valladolid (España). Fuente: [29]

Otras técnicas pertenecientes a este grupo, cuyas soluciones constructivas cuentan, no obstante, con una menor presencia a nivel nacional, incluyen: las soluciones de tierra vertida, que Gómez-Patrocínio [29] distingue como aquellas soluciones de tapia donde se ha prescindido de la compactación; las soluciones de tierra apilada, generadas mediante

técnicas de superposición y apilamiento de bolas de material; y las soluciones de tierra modelada, que siguen técnicas simples de modelado manual de la tierra, diferenciándose del resto de soluciones por presentar un espesor más reducido.

#### 4.1.4.1.2. Muros de fábrica

Este grupo de técnicas se caracteriza por generar soluciones constructivas mediante el aparejo de piezas de adobe (ver **Fig. 16**), esto es, bloques pequeños moldeados con adobera o gradilla, y secados de manera previa a su puesta en obra [28]. Otras técnicas menos comunes pertenecientes a este grupo incluyen aquellas donde las soluciones constructivas son generadas mediante elementos cortados directamente del terreno o mediante piezas de adobe modeladas manualmente prescindiendo del uso de adoberas, como es el caso de los adobes manuales [29].



**Fig. 16.** Construcciones mediante solución constructiva de muro de fábrica de adobe con distintos aparejos (de izquierda a derecha): aparejo a tizón, aparejo a soga, aparejo a soga y tizón, y aparejo en espina de pez.  
Fuente: [29]

Asimismo, si bien en [29] no se referencian como parte de las técnicas tradicionales, las más recientes soluciones mediante bloques de tierra comprimida (BTC) corresponden a soluciones de muros de fábrica, en las que, en lugar de adobe, la unidad modular la constituye este bloque de pequeñas dimensiones. El BTC se compone de una masa de tierra con un pequeño porcentaje de humedad, que es sometida a procesos de compactación mecánica con prensas hidráulicas [28], de manera previa a su puesta en obra, para la cual presenta una facilidad de manipulación similar al ladrillo cerámico. Adicionalmente, esta masa de tierra puede estar estabilizada mediante la adición de cemento (en concentraciones habituales de 5-8% m/m) [29]. Estos procesos no sólo dotan a la solución de importantes prestaciones mecánicas, sino que le permiten ser fabricado en una amplia variedad de dimensiones y formas geométricas dando respuesta a exigencias particulares de configuración.



#### 4.1.4.1.3. Muros mixtos

Este variado grupo de técnicas se caracteriza por generar soluciones constructivas complejas, en las que se ven involucrados materiales de gran diversidad que adquieren una función específica. Gómez-Patrocínio [29] agrupa las diversas soluciones registradas en la arquitectura tradicional a nivel nacional en dos grupos de soluciones constructivas principales: los muros entramados con relleno de tierra (ver **Fig. 17**) y los muros tejidos (ver **Fig. 18**). Ambos grupos disponen de una subestructura portante de madera, aunque difieren en la composición del relleno que cierra los cuarteles huecos delimitados por la misma. Por un lado, las soluciones de muros entramados con relleno de tierra se generan siguiendo técnicas de relleno mediante materiales de tierra, entre otros. Por otro lado, las soluciones de muros tejidos se generan mediante técnicas previas de urdimbre de fibras, trabadas con la subestructura de madera, y de refuerzo posterior mediante el revestimiento con tierra.



**Fig. 17.** Solución constructiva de muro entramado con relleno de adobes inclinados en Navapalos, Soria (España). Fuente: [29]



**Fig. 18.** Solución constructiva de muro tejido con mimbre en Forna, León (España). Fuente: [29]

#### 4.1.4.1.4. Recubrimientos y acabados

Este último grupo de técnicas engloba todas aquellas relativas a la generación de una solución de acabado, recubrimiento o protección de otras soluciones constructivas (ver **Fig. 19**), donde la tierra, en su función de acabado final, asume, señala Gómez-Patrocínio [29], el papel de elemento sustituible de sacrificio para la protección de la solución a la exposición y sus problemáticas.



**Fig. 19.** Solución de cubierta en tierra en Las Palmas de Gran Canaria, Las Palmas (España). Fuente: [29]

#### 4.1.4.2. Soluciones constructivas basadas en arcilla cocida

Si bien no son objeto de esta investigación, estas soluciones implican el uso de piezas cerámicas fabricadas a partir de arcillas, por lo que se estima pertinente una breve caracterización de tales soluciones basadas en arcilla cocida, siguiendo para ello la descripción de los productos de construcción y materiales cerámicos del Catálogo de Soluciones Cerámicas, editado por Hispalyt (Asociación Española de Fabricantes de Ladrillos y Tejas), en colaboración con el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (CSIC) [39].

Estas soluciones engloban la construcción de muros de fábrica mediante técnicas de aparejo de unidades de piezas cerámicas (ladrillos y bloques cerámicos). Elaboradas a partir de arcillas, con o sin arena, combustibles u otros aditivos; su fabricación abarca técnicas de modelado, secado y cocción a temperaturas suficientemente altas «para alcanzar una ligazón cerámica» [39]. Si bien se presentan en una amplia variedad de dimensiones, los tipos y formatos de ladrillos y bloques cerámicos pueden ser clasificados según su uso y su configuración (ver **Tabla 2**).

Así, estos materiales se pueden agrupar, según su uso, en tres grandes grupos: los ladrillos cara vista (ver **Fig. 20**), empleados en soluciones de muros de fábrica que por su proceso de fabricación permiten prescindir de revestimientos o acabados finales; los ladrillos y bloques para revestir (ver **Fig. 21** y **Fig. 22**), los cuales sí precisan de una capa de revestimiento exterior en la solución de muro de fábrica; y los bloques cerámicos aligerados machihembrados (ver **Fig. 23**), cuyo diseño (con un volumen de huecos de 45-60%) les



permite generar soluciones de muros de fábrica de una hoja con unas prestaciones mecánicas, térmicas y acústicas similares a aquellas de varias hojas. Cabe señalar la existencia de una gran variedad de piezas especiales para la resolución de puntos singulares en las soluciones de fábrica generadas con estos materiales.

**Tabla 2.** Clasificación de ladrillos y bloques cerámicos según su uso y según su configuración. Fuente: [39]

Según su uso	Según su configuración		
	Tipos		Subtipos
Ladrillos cara vista (ver Fig. 20)	Nombre	<b>Ladrillo macizo</b> (ver Fig. 20)	<b>Ladrillo de tejar o manual</b> (ver Fig. 20)
	Descripción	Ladrillo sin perforaciones o con perforaciones* con un volumen de huecos inferior al 25%	Ladrillo de apariencia tosca con caras rugosas y no muy planas
	Fabricación	Técnicas de extrusionado de la arcilla a través de una boquilla o de prensado sobre un molde (incorporando en una o ambas tablas del ladrillo unos rebajes llamados cazoletas)	Técnicas de moldeado manual o mecánico que intenta simular las deformaciones de ladrillos hechos a mano
	Nombre	<b>Ladrillo perforado</b> (ver Fig. 20)	
	Descripción	Ladrillo con una o más perforaciones* con un volumen de huecos inferior al 25%	
	Ladrillos y bloques para revestir (ver Fig. 21 y Fig. 22)	Nombre	<b>Pieza maciza</b>
Descripción		Pieza sin perforaciones o con perforaciones* con un volumen de huecos inferior al 25%	
Nombre		<b>Pieza perforada</b> (ver Fig. 21)	
Descripción		Pieza con una o más perforaciones* con un volumen de huecos entre el 25% y el 45%	
Nombre		<b>Pieza aligerada</b> (ver Fig. 21)	
Descripción		Pieza con una o más perforaciones* con un volumen de huecos entre el 45% y el 60%	
Nombre		<b>Pieza hueca</b> (ver Fig. 22)	<b>Ladrillo hueco de gran formato</b> (ver Fig. 22)
Descripción	Pieza con una o más perforaciones* con un volumen de huecos inferior al 70%	Ladrillo hueco con una longitud superior a 300mm y un grosor igual o superior a 40 mm e inferior a 140 mm	
<b>Bloques cerámicos aligerados machihembrados</b> (ver Fig. 23)			

\*Se refiere a perforaciones que atraviesan por completo la pieza, perpendicularmente a la cara de apoyo

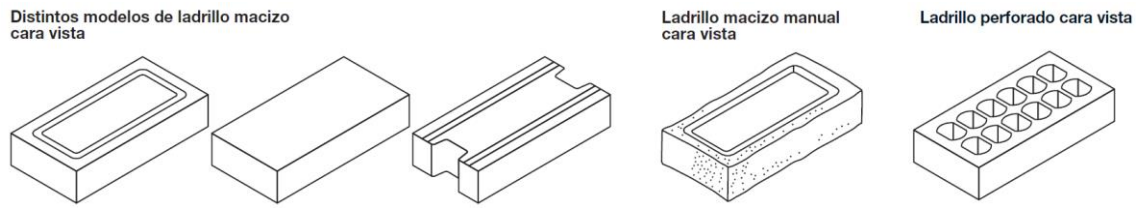


Fig. 20. Tipos de ladrillos cerámicos cara vista según su configuración. Fuente: [39]

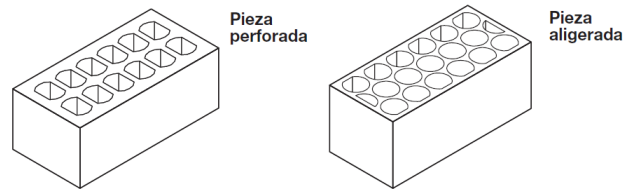
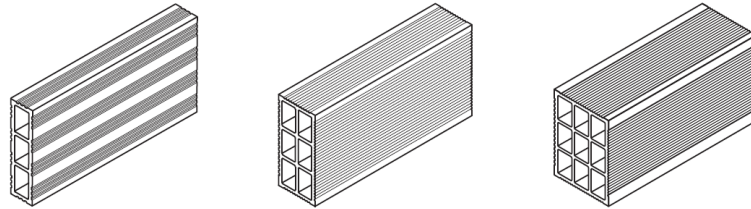


Fig. 21. Tipos de ladrillos y bloques cerámicos para revestir: pieza perforada y pieza aligerada. Fuente: [39]

Ladrillos huecos para revestir (sencillo, doble y triple)



Ladrillos huecos gran formato para revestir (sencillo y doble)

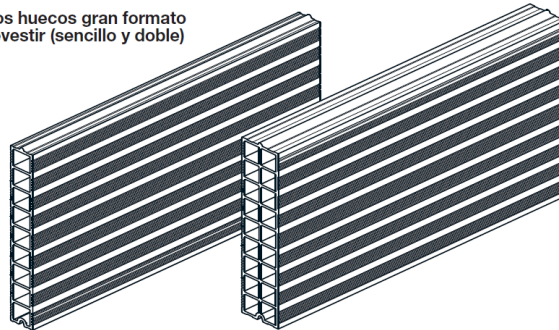


Fig. 22. Tipos de ladrillos y bloques cerámicos para revestir: ladrillos huecos y ladrillo hueco de gran formato. Fuente: [39]

Bloques cerámico aligerado machihembrado

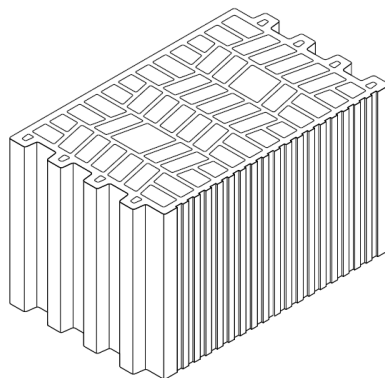


Fig. 23. Bloque cerámico aligerado machihembrado. Fuente: [39]

#### 4.1.4.3. Soluciones constructivas avanzadas basadas en arcilla

Como ya se refirió al inicio de este capítulo, en el marco de los compromisos y las problemáticas que la arquitectura ha contraído y afronta hasta el día de hoy, se han reforzado, especialmente desde mediados del siglo XX, los proyectos de experimentación, reinterpretación y reintegración de técnicas y soluciones tradicionales basadas en arcilla, que confían en sus potenciales beneficios en el camino hacia un sector de la edificación bajo en carbono [31,32]. Estas líneas abiertas de investigación y desarrollo de soluciones avanzadas basadas en arcilla se focalizan en el estudio de las técnicas de diseño y fabricación de las soluciones constructivas tradicionales a la luz de los criterios y las normativas actuales en relación a la implementación, las prestaciones y los estándares de calidad exigibles para su aplicación en edificación [40].

En este sentido, en una revisión crítica de las soluciones de construcción en tierra desarrolladas actualmente, Giuffrida et al. [40] detectan una ralentización notable en la consecución de estandarizaciones y aplicaciones finales dentro de estas líneas de investigación y desarrollo. Frente a esta problemática, advierten de la importancia de articular metodologías y procesos de diseño y desarrollo desde una visión interdisciplinar del producto o del comportamiento de la solución, que permita una optimización integrada e íntegra de parámetros, condiciones y comportamientos en su aplicación final. Estos procesos de diseño se revisan detalladamente en [41].

A tal fin, Giuffrida et al. [40] reconocen notables modificaciones en los nuevos procesos de manufacturación de las soluciones avanzadas basadas en arcilla, especialmente, de las soluciones avanzadas de tierra apisonada (tapia); y subrayan los beneficios de vincular estos procesos de diseño y desarrollo con tecnologías adaptadas de prefabricación para soluciones avanzadas de construcción en tierra, dados sus potenciales beneficios ante fallas y cuestiones recurrentes:

- Revisión sistemática y optimización de la materia prima para su integración en la solución en base a criterios evaluados
- Control y calibración de las fracciones de materiales agregadas para la composición de la solución constructiva
- Rendimiento y reproducibilidad del proceso de fabricación de la solución constructiva
- Evaluación y optimización de las características físicas, térmicas y mecánicas tanto de los materiales como de la solución, mediante ensayos experimentales y monitorización
- Certificaciones de garantía de calidad de la solución mediante fichas de producto

En esta revisión de las soluciones avanzadas de construcción en tierra desarrolladas actualmente [40], se distingue una predominancia de la experimentación y fabricación mediante técnicas de estabilización y de refuerzo para la consecución de mejoras en las prestaciones físicas, térmicas y mecánicas de soluciones constructivas tradicionales. En este sentido, Galán-Marín et al. [28] estudian el uso innovador de las arcillas en soluciones alternativas a través de, por un lado, la revisión de las líneas de investigación y las tecnologías de estabilización existentes. Entre las medidas de mejora del comportamiento desde las que se desarrollan estas líneas y tecnologías, destacan: la mejora del comportamiento mecánico, optimizando propiedades como la resistencia a compresión; la reducción de la porosidad y las variaciones de volumen a fin de mejorar el control de los

procesos de hinchado y encogimiento del material durante las variaciones de contenido en humedad; y la reducción de la abrasión superficial, así como la mejora de la impermeabilización y la durabilidad, a fin de aumentar la resistencia a la erosión y la exposición exterior [28].

Las técnicas de estabilización de las arcillas para la consecución de estas medidas de mejora del comportamiento se pueden agrupar, según [28], en tres categorías principales: técnicas de estabilización mecánica, que incluyen técnicas de compactación y variación de propiedades como la densidad, la compresibilidad, la permeabilidad y la porosidad de las arcillas; técnicas de estabilización física, mediante variaciones en las propiedades de textura de las arcillas, que abarca técnicas de control de mezcla de distintas fracciones de grano, así como técnicas de secado o congelación, de tratamiento térmico y de tratamiento eléctrico; y, por último, técnicas de estabilización química, que incluyen técnicas de composición y adición para la variación de las propiedades de las arcillas mediante la unión o recubrimiento de los granos o mediante una reacción físico-química entre los granos de arcillas y los materiales aditivos.

Entre las técnicas de estabilización química para soluciones avanzadas basadas en arcilla, en [28] se reconoce una amplia variedad en el uso de aditivos, destacando especialmente como materiales más comunes el cemento, la cal, el betún, los residuos silíceos (cenizas) y las resinas y polímeros, entre otros.

Por otro lado, Galán-Marín et al. [28] revisan igualmente las líneas de investigación y las tecnologías de refuerzo con fibras aplicadas en soluciones avanzadas basadas en arcilla para la mejora de su comportamiento mecánico. Estas tecnologías se basan en la integración de fibras con una resistencia a tracción relativamente alta dentro de la matriz de arcilla. Los esfuerzos cortantes dentro de la arcilla movilizan la resistencia a tracción en las fibras, incrementando de este modo, a su vez, la resistencia de la arcilla [28]. En este marco, las líneas de investigación se centran en la reinterpretación y experimentación con materiales fibrosos de diverso origen, principalmente mediante la observación de sistemas naturales y de sistemas antrópicos presentes desde las primeras prácticas constructivas; siendo ejemplo de ello la resistencia de las laderas naturales, por la presencia de raíces vegetales en el suelo o los muros de tierra apisonada reforzada con ramas de árboles que constituyen la Gran Muralla China [28].

Entre las técnicas innovadoras de refuerzo de las arcillas, [28] destaca las tecnologías de refuerzo de fibra corta, agrupadas en dos categorías según sus revisiones: materiales fibrosos distribuidos aleatoriamente y materiales fibrosos orientados; contando esta última categoría con un mayor desarrollo que la primera, en cuanto a la optimización de las propiedades y dimensiones de la fibra y a los mecanismos de refuerzo. Para los materiales fibrosos integrados en estas tecnologías emergentes, Galán-Marín et al. [28] ofrecen una clasificación de los mismos detalladamente caracterizada y referenciada, cuya estructura principal se recoge en la **Tabla 3**.

**Tabla 3.** Clasificación de materiales fibrosos en técnicas de refuerzo de soluciones avanzadas basadas en arcillas. Fuente: [28]

Tipo	Subtipo	Material
<b>Fibras naturales</b>	Fibras vegetales	Fibra de coco (bonote)
		Sisal
		Palma
		Yute
		Lino
		Paja de cebada
		Bambú
		Caña
	Fibras animales	Fibra de alfa-queratina
<b>Fibras sintéticas</b>	Fibras de plástico	Polipropileno (PP)
		Poliéster (PET)
		Polietileno (PE)
		Fibra de nailon
		Alcohol polivinílico (PVA)
	Fibras de metal y de vidrio	Fibra de acero
		Fibra de vidrio

Para concluir, respecto a las aplicaciones finales de las soluciones constructivas avanzadas basadas en arcilla, Giuffrida et al. [40] llevan a cabo un estudio de mercado sobre la manufacturación y comercialización de dichas soluciones, concretamente de soluciones avanzadas basadas en las técnicas de tierra apisonada (tapia). Este estudio permite, por un lado, distinguir como principales proveedores a los Estados Unidos y países europeos como Alemania, Austria, España y Francia; y, por otro, destacar como principales aplicaciones finales la relación de productos que sigue, mayormente vinculados a procesos de prefabricación y la construcción en seco:

- Paneles de revestimiento para muros, falsos techos y tabiques (ver **Fig. 24**)
- Paneles radiantes con sistema hidrónico de tuberías embebidas o con alimentación eléctrica (ver **Fig. 25**)
- Paneles de aislamiento (ver **Fig. 26**)
- Bloques de tierra comprimida (BTC) prefabricados (ver **Fig. 27**)
- Preparados de mezcla de arcillas y otros materiales o aditivos para la construcción on-site de soluciones de tierra apisonada (ver **Fig. 28**)



Fig. 24. Panel de revestimiento LEMIX®. Fuente: [42]



Fig. 25. Paneles radiantes de WEM® con sistema hidrónico o con variante eléctrica. Fuente: [43]



Fig. 26. Panel de aislamiento Pavaboard® HFA N+F. Fuente: [44]





Fig. 27. Bloques de tierra comprimida BTC Bioterre®. Fuente: [45]

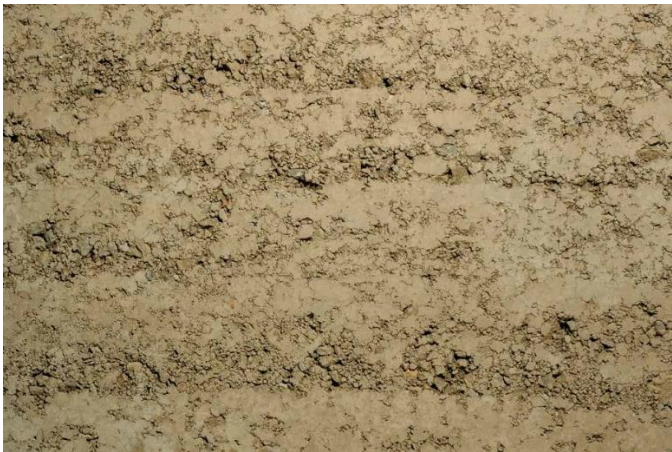


Fig. 28. Preparado de mezcla para soluciones de tierra apisonada Rammed earth de CLAYTEC®. Fuente: [44]

## 4.2. Sistemas de almacenamiento de energía térmica

### 4.2.1. Estrategias de acondicionamiento pasivo

En sus investigaciones sobre arquitectura vernácula [46–48], Neila et al. [47] declaran que, sólo aceptando las condiciones ambientales de la existencia, así como las posibilidades y las limitaciones que ofrecen para la adaptación humana, resulta posible considerar la arquitectura como aquel instrumento o sistema vernáculo de adaptación en nuestra interacción con el entorno. Una mayor comprensión mediante la observación reflexiva de esta interacción elemental posibilita la consecución de un diseño apropiado de las infraestructuras que sustentan las necesidades de habitabilidad de una comunidad [47]. En este sentido, inversamente, observar los sistemas constructivos de la arquitectura vernácula de un territorio permite entender la eficiencia de sus mecanismos adaptativos frente a las condiciones ambientales.

Estos mecanismos comprenden dispositivos, sistemas o hábitos que se integran en un principio o estrategia proyectada por la comunidad de un territorio para proveerse el mayor bienestar en sus espacios habitados, en base a sus recursos y a sus capacidades técnicas. Mientras más eficientemente sirvan estas estrategias a las necesidades, mayor será el bienestar de su hábitat. Neila et al. [47] distinguen tres categorías entre los procesos de formación de estas estrategias en el macrobioclima mediterráneo: la habitabilidad básica, la etnia y el acondicionamiento pasivo.

Las estrategias de habitabilidad básica son las primeras en desarrollarse en la secuencia histórica según [47], y se refieren a los espacios arquitectónicos que responden a las exigencias de una vida sana, incluyendo los sistemas de protección frente a los factores climáticos, la preservación y renovación del ambiente interior y el suministro de agua y de luz. En segundo lugar, las estrategias étnicas abarcan aquellas que concuerdan y facilitan las relaciones de organización, de asociación, de zonificación (por confort o actividad) y de sistematización de una comunidad, incluyendo las relaciones familiares, la organización social, la capacidad técnica de gestionar recursos, los hábitos y el estilo de vida de una comunidad [47]. Estas estrategias derivan de la complejización de las sociedades sobre la base de las estrategias de habitabilidad básica. Finalmente, las estrategias de acondicionamiento pasivo (ver **Fig. 29**) constituyen estrategias más complejas que se desarrollan en último lugar a fin de mejorar la habitabilidad básica. Se basan en los principios físicos de la transferencia de calor y, por ende, requieren de técnicas y conocimiento científico más complejos [47,48]. La disposición de estas estrategias en la edificación depende pues de las tecnologías y los conocimientos culturales en base a los cuales opera una comunidad frente a sus factores climáticos [47].



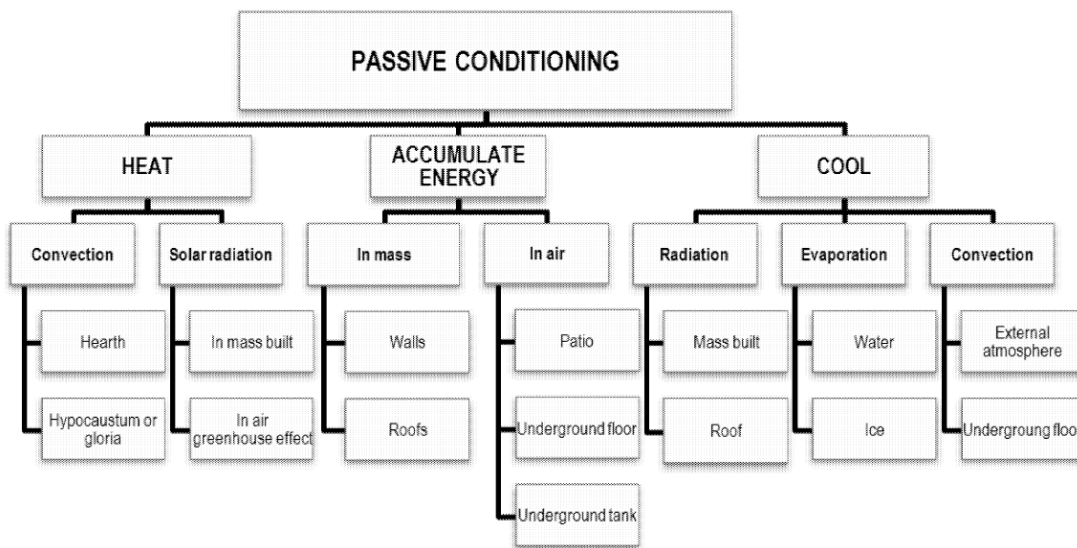


Fig. 29. Clasificación de las estrategias de acondicionamiento pasivo en la arquitectura vernácula de la región mediterránea. Fuente: [47]

En este marco, Neila [46] concluye que las estrategias de acondicionamiento pasivo en la arquitectura se fundamentan en tres pilares sobre el aprovechamiento de la energía: la captación, la acumulación y la distribución. Asimismo, advierte de la importancia de una correcta articulación entre estos pilares a fin de garantizar la eficacia de dichas estrategias: la captación de energía «sin una correcta y efectiva acumulación» de la misma estaría impidiendo en cualquier caso su aprovechamiento [46]. En este sentido, recuerda que la energía solar es errática y limitada en el tiempo, por lo que aspirar a un reparto gradual de esta energía a lo largo del día, o incluso a su reserva para otros días, exige «acumularla convenientemente» [46].

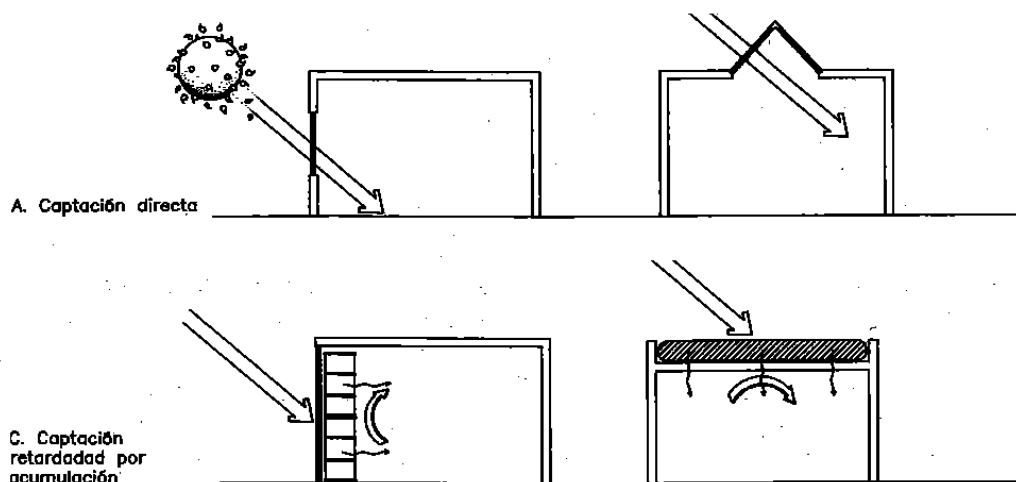
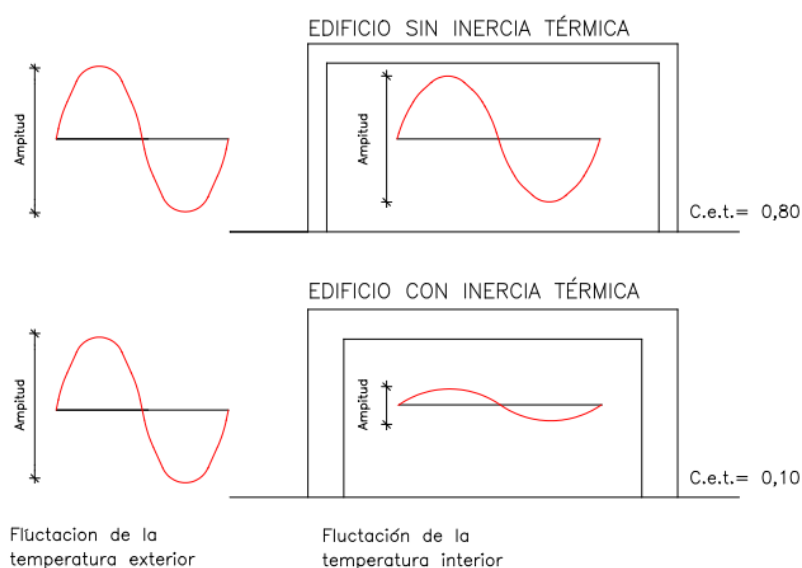


Fig. 30. Sistemas de captación directa y de captación retardada por acumulación en soluciones constructivas verticales y horizontales. Fuente: [46]

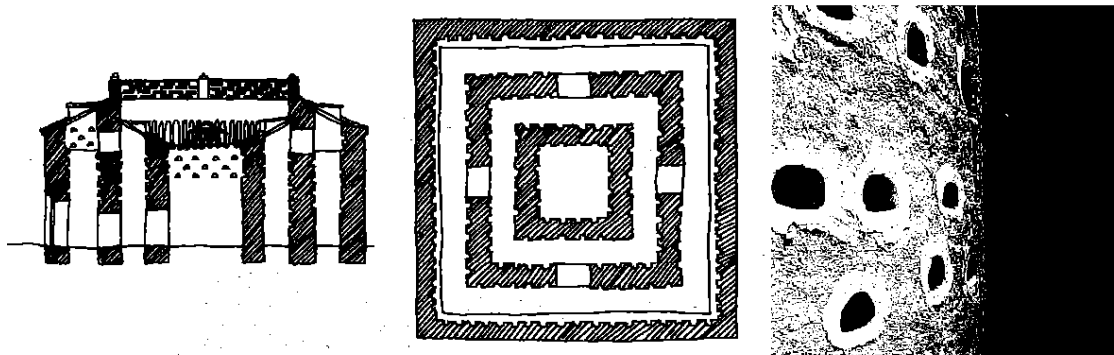
En su revisión sistemática de las estrategias bioclimáticas desarrolladas por diversas arquitecturas vernáculas a lo largo de la historia [46], en el denominado macrobioclima mediterráneo Neila presenta como invariantes las cinco estrategias que siguen: la flexibilidad ante la radiación solar (captación/protección), la flexibilidad en el diseño de las soluciones constructivas (masa térmica/aislamiento térmico), el enfriamiento evaporativo, el enfriamiento radiante y la ventilación. Es por ello que, junto a la ventilación del aire interior, la capacidad de almacenamiento de energía de las soluciones constructivas con gran masa térmica de la arquitectura vernácula, se puede destacar como una estrategia de acondicionamiento pasivo fundamental, vinculada a la consecución de la estabilidad térmica en espacios interiores, frente a las fluctuaciones de la temperatura exterior e interior y, especialmente, frente a los fenómenos de sobrecalentamiento durante los periodos estivales [46].

Esto significa que, gracias a sus propiedades y dimensiones, estas soluciones constructivas son capaces de *absorber* el calor aumentando su propia temperatura y amortiguar así los valores de la temperatura interior (ver **Fig. 31**) frente a las permanentes alternaciones energéticas que experimentan los espacios, sea por las variaciones climáticas externas (día-noche, calor-frío) o por las cargas internas, es decir, por el calor disipado por los ocupantes, los sistemas de iluminación y todos los dispositivos restantes que consuman y transformen energía (encendido-apagado de dispositivos y equipos, apertura-cierre de ventanas, ocupación mayor-menor) [46]. Durante los periodos estivales, los altos valores de inercia térmica conferidos por estas soluciones constructivas permitirán evitar también los golpes térmicos o las denominadas temperaturas pico durante las horas centrales de radiación solar [46]. Este calor almacenado será liberado gradualmente por la solución a medida que la temperatura circundante descienda, permitiendo así que la temperatura del espacio fluctúe sólo levemente y que la energía térmica sea suministrada en correlación a la demanda real de las condiciones interiores.



**Fig. 31.** Fluctuación de la temperatura interior en edificios con diferentes masas térmicas. Fuente: [46]

Un ejemplo de estas estrategias pasivas de acondicionamiento, incluido en la revisión sistemática de arquitecturas vernáculas por Neila [46], se encuentra en los denominados palomares de Tierra de Campos, una comarca que se sitúa en la meseta central de la Península Ibérica. Estas edificaciones, de volumetría rotunda (planta circular, cuadrada, rectangular), se construyen a partir de los recursos autóctonos para la conformación de soluciones de muro apisonado (tapia) o de muro de fábrica de adobes, principalmente (ver **Fig. 32**). Entre sus estrategias bioclimáticas, se destaca la masa térmica característica de estas construcciones en tierra, las cuales, gracias a su espesor, su densidad y otras propiedades asociadas a los materiales constituyentes, confieren una gran inercia térmica a los espacios interiores frente a las fluctuaciones de la temperatura exterior. Asimismo, aquellas tipologías de palomar que incluyen un patio interior aportan una ventilación adicional a la que proporcionan los huecos para la entrada de las aves.



**Fig. 32.** Representación gráfica de una tipología cuadrada de los palomares de Tierra de Campos, junto a una fotografía de los huecos del cerramiento para la entrada de las aves. Fuente: [46]

#### 4.2.2. Métodos y materiales de almacenamiento de energía térmica para edificación

El método de almacenamiento de energía térmica, analizado en el subapartado anterior, para soluciones constructivas de gran masa térmica en la arquitectura vernácula mediterránea, incluyendo entre ellas las soluciones basadas en materiales arcillosos, sólo constituye, no obstante, una de las formas de almacenamiento posibles en edificación; tratándose, concretamente, de un sistema de almacenamiento térmico sensible o de calor sensible.

Los sistemas de almacenamiento de energía térmica (TES) abarcan, por tanto, aquellas estrategias de acondicionamiento pasivo que permiten la mejora del comportamiento energético de los edificios mediante la captación, acumulación y distribución eficiente de energía térmica. En base a las investigaciones sobre aplicaciones de TES para edificación de Lizana [13,49,50], estos sistemas se pueden agrupar, según el método de almacenamiento del material o compuesto seleccionado, en tres categorías distintas (ver **Fig. 33**): almacenamiento sensible, almacenamiento latente o almacenamiento termoquímico. Asimismo, en cuanto a materiales de almacenamiento de energía térmica disponibles para edificación, se revisa en cada caso la relación de materiales caracterizados por Lizana et al. [49], concretamente aquellos asociados a métodos de almacenamiento térmico sensible y latente, dados los objetivos de la presente investigación.

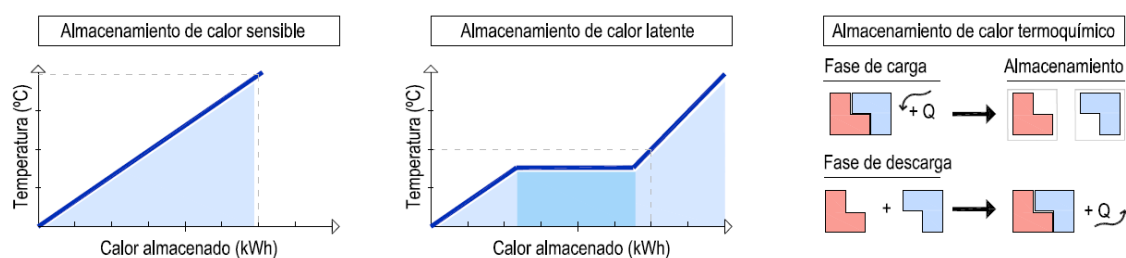


Fig. 33. Métodos de almacenamiento de energía térmica. Fuente: [51]

#### 4.2.2.1. Almacenamiento térmico sensible

El almacenamiento térmico sensible se basa en el aumento o descenso de la temperatura de un material o compuesto, caracterizado con una considerable capacidad de almacenamiento térmico; almacenando y liberando calor en base a este proceso (ver **Fig. 33**). Recuérdese el ejemplo presentado en el subapartado anterior en el que las soluciones constructivas, en base a sus dimensiones y materiales, aumentaban su temperatura durante la radiación solar, evitando así el sobrecalentamiento en los espacios interiores. Estos materiales se denominan materiales de almacenamiento térmico sensible (SHSMS), y pueden ser materiales de almacenamiento líquidos o sólidos.

La **Tabla 4** recoge los materiales de almacenamiento térmico sensible (líquidos y sólidos) revisados, según las referencias, por Lizana et al. [49], junto a propiedades relevantes para este método de TES, como un bajo coste, una alta densidad, una buena conductividad térmica y una alta capacidad calorífica. La **Fig. 34**, elaborada por Lizana [13], recoge igualmente esta relación de materiales, según su capacidad calorífica específica y su difusividad térmica.

Lizana et al. [49] refieren este método de almacenamiento como el más extendido para aplicaciones en edificación, y estima la capacidad media de almacenamiento térmico de la mayoría de los materiales empleados a tal fin en aproximadamente  $100 \text{ MJ/m}^3$ , distinguiéndose el agua como el mejor material líquido disponible con una capacidad de almacenamiento de  $250 \text{ MJ/m}^3$  para un gradiente de temperatura de  $60^\circ\text{C}$  y de  $63 \text{ MJ/m}^3$  para un gradiente de  $15^\circ\text{C}$  para aplicaciones de calefacción y de refrigeración, respectivamente. No obstante, entre los principales inconvenientes de este material se encuentran los altos costes de inversión para las infraestructuras de almacenamiento del líquido y los riesgos de fuga [49]. Además del agua, entre los materiales líquidos para el almacenamiento térmico sensible, destaca el amplio uso de los aceites y del alcohol puro o derivados para aplicaciones de refrigeración y de calefacción.

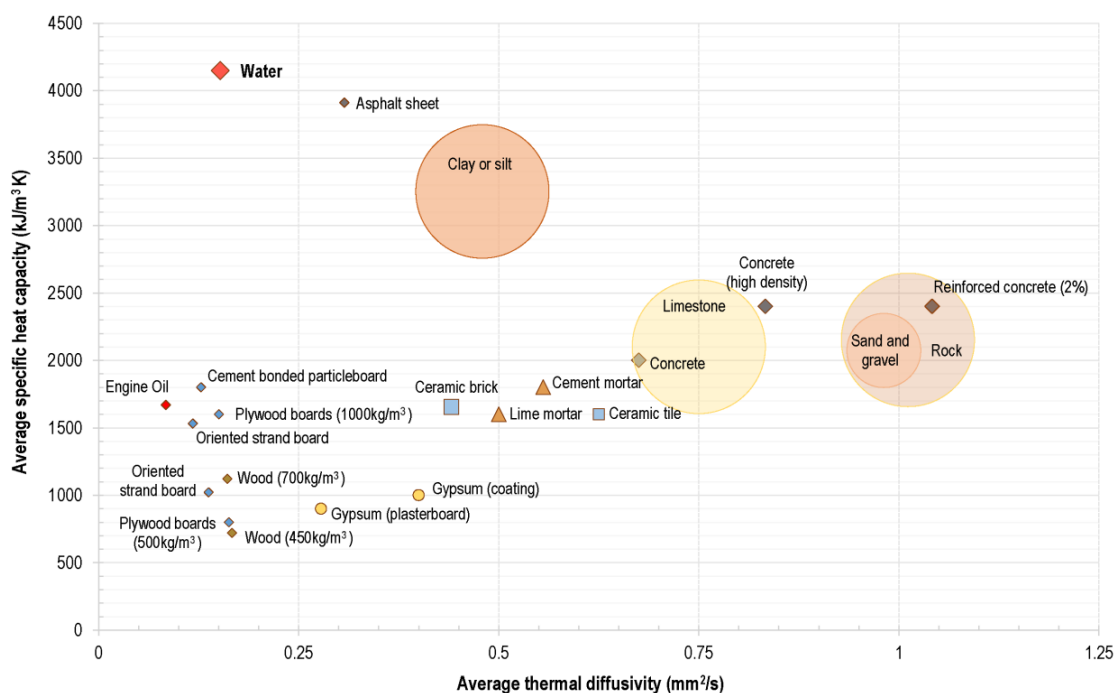
Por su parte, según las referencias revisadas, en [49] los materiales sólidos más relevantes en almacenamiento térmico sensible incluyen, en primer lugar, dada su alta densidad y conductividad térmica, las rocas, seguidas por los hormigones, el asfalto, las arenas y gravas, los morteros de cemento, los materiales cerámicos y las arcillas; destacando estas últimas con los mayores valores de capacidad calorífica específica (ver **Tabla 4**).

Las aplicaciones más prometedoras basadas en almacenamiento térmico sensible, según Lizana et al. [49], incluyen soluciones de gran inercia térmica para aplicaciones pasivas, TABS, tanques de agua de pequeña escala y sistemas estacionarios de TES de gran escala. Entre los inconvenientes asociados a los sistemas de TES sensible, destaca su

relativamente baja capacidad de almacenamiento térmico (también referida como densidad energética) frente a otros métodos [49].

**Tabla 4.** Relación de los principales materiales en el almacenamiento de energía térmica sensible para aplicaciones en edificación, junto a propiedades relevantes para este método de TES. Fuente: [49]

Material	Coste medio del material	Tipo	Propiedades			
			Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Conductividad térmica (W/m°C)	Capacidad calorífica específica (kJ/kgK)	Capacidad calorífica específica volumétrica media (kJ/m <sup>3</sup> K)
Asfalto	56 €/m <sup>3</sup>	Sólido	2300	1.2	1.7	3910
Aceite	6560 €/m <sup>3</sup>	Líquido	888	0.14	1.88	1669
Ladrillo cerámico	36-64 €/m <sup>3</sup>	Sólido	1800	0.73	0.92	1656
Madera	404 €/m <sup>3</sup>	Sólido	450	0.12	1.6	720
Tableros de madera contrachapada	1114 €/m <sup>3</sup>	Sólido	500	0.13	1.6	800
Panel de yeso	385 €/m <sup>3</sup>	Sólido	900	0.25	1	900
Capa de yeso	78 €/m <sup>3</sup>	Sólido	1000	0.4	1	1000
Tableros de fibra orientada	328 €/m <sup>3</sup>	Sólido	600	0.14	1.7	1020
Madera	404 €/m <sup>3</sup>	Sólido	700	0.18	1.6	1120
Tableros de fibra orientada	328 €/m <sup>3</sup>	Sólido	900	0.18	1.7	1530
Baldosa cerámica	1600-3500 €/m <sup>3</sup>	Sólido	2000	1	0.8	1600
Mortero de cal	123 €/m <sup>3</sup>	Sólido	1600	0.8	1	1600
Tableros de madera contrachapada	1114 €/m <sup>3</sup>	Sólido	1000	0.24	1.6	1600
Tableros de partículas aglomeradas con cemento	1309 €/m <sup>3</sup>	Sólido	1200	0.23	1.5	1800
Mortero de cemento	115 €/m <sup>3</sup>	Sólido	1800	1	1	1800
Hormigón	76 €/m <sup>3</sup>	Sólido	2000	1.35	1	2000
Arenas y gravas	6-8 €/m <sup>3</sup>	Sólido	1700-2200	2	0.91-1.18	2072
Caliza	70-819 €/m <sup>3</sup>	Sólido	1600-2600	0.85-2.3	1	2100
Rocas	64-742 €/m <sup>3</sup>	Sólido	1500-2800	0.85-3.5	1	2150
Hormigón (de alta densidad)	100 €/m <sup>3</sup>	Sólido	2400	2	1	2400
Hormigón reforzado (2%)	121 €/m <sup>3</sup>	Sólido	2400	2.5	1	2400
Arcillas o limos	-	Sólido	1200-1800	1.5	1.67-2.5	3252
Agua (80°C)	1.6 €/m <sup>3</sup>	Líquido	970	0.67	4.19	4064
Agua (40°C)	1.6 €/m <sup>3</sup>	Líquido	990	0.63	4.19	4148
Agua (10°C)	1.6 €/m <sup>3</sup>	Líquido	1000	0.6	4.19	4190



**Fig. 34.** Relación de los principales materiales en el almacenamiento de energía térmica sensible para aplicaciones en edificación. Fuente: [13]

#### 4.2.2.2. Almacenamiento térmico latente

El almacenamiento térmico latente se basa en el intercambio de energía térmica requerido por un material o compuesto para cambiar de fase (de un estado físico a otro), como consecuencia de la variación de la temperatura de su entorno; almacenando y liberando calor de este modo. Estos materiales se denominan materiales de cambio de fase (MCF o *phase change materials*, PCMs) y, en comparación con los SHSMs, son capaces de almacenar grandes cantidades adicionales de energía térmica en gradientes de temperatura muy reducidos en torno a su temperatura de cambio de fase [49] (ver **Fig. 33**).

Según la literatura revisada [49,52,53], los materiales de almacenamiento térmico latente o de cambio de fase (PCMs) se pueden dividir, según los estados físicos que implica su cambio de fase, en cuatro categorías: sólido-sólido, sólido-gas, sólido-líquido y líquido-gas. Lizana et al. [49] destaca los materiales de cambio de fase sólido-líquido como los más comunes para soluciones de aplicación en edificación, debido, según refiere Oliver [52], a la menor cantidad de energía y las reducidas variaciones de volumen durante el cambio de fase que caracterizan a estos materiales. Los materiales incluidos en esta categoría de PCMs (sólido-líquido) se pueden agrupar, a su vez, en: compuestos orgánicos, compuestos inorgánicos y eutécticos (mezclas entre diversos materiales orgánicos y/o inorgánicos) [49]. Cada uno de estos grupos puede categorizarse, a su vez, en diversos subgrupos, tal y como ilustra la **Fig. 35**.

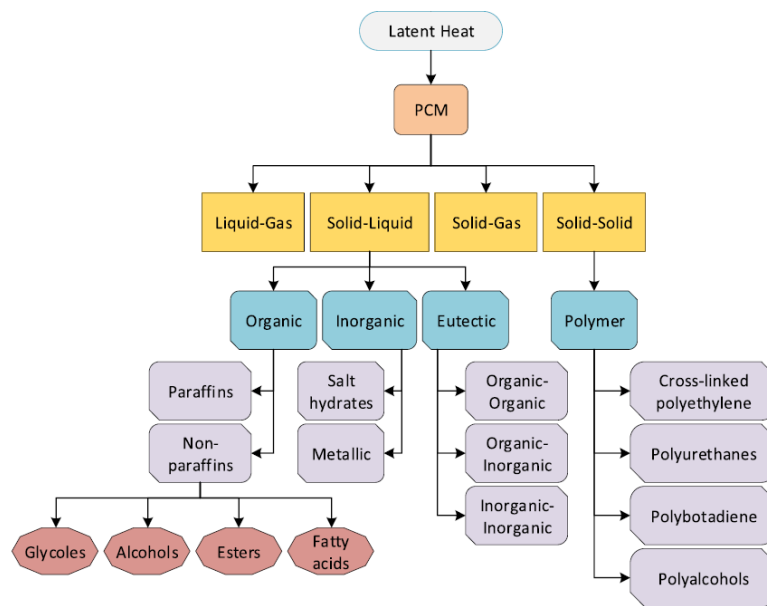


Fig. 35. Clasificación de materiales de almacenamiento térmico latente o de cambio de fase (PCMs). Fuente: [53]

Los materiales de cambio de fase más destacados para aplicaciones en edificación, según las referencias [49,52], incluyen: las parafinas, entre los compuestos orgánicos; las sales hidratadas, entre los compuestos inorgánicos; y las mezclas eutécticas. Las parafinas se refieren a un grupo de alcanos puros que presentan propiedades favorables a aplicaciones basadas en TES, con una capacidad media de almacenamiento térmico latente de aproximadamente  $170 \text{ MJ/m}^3$  y una conductividad térmica media de  $0.2 \text{ W/m}^\circ\text{C}$  [49]. Por su parte, las sales hidratadas son aleaciones de sales inorgánicas y agua, que cuentan con una capacidad de almacenamiento térmico latente y una conductividad térmica relativamente altas (aproximadamente de  $350 \text{ MJ/m}^3$  y de  $0.5 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ , respectivamente) [49,52]. Si bien presentan una capacidad de almacenamiento superior a las parafinas y un menor coste, estas sales presentan ciertas limitaciones persistentes, entre ellas, su baja fiabilidad térmica para periodos de larga operación [49]. Por último, las mezclas eutécticas se refieren a mezclas de materiales de cambio de fase inorgánicos (mayormente sales hidratadas, según Lizana [49]) y/o orgánicos, que presentan una temperatura de fusión inferior a la de sus materiales constituyentes.

En sus trabajos de investigación [13,49], Lizana refiere la existencia de más de 250 soluciones de materiales de cambio de fase disponibles en el mercado (en un rango de temperatura entre  $-10^\circ\text{C}$  y  $+120^\circ\text{C}$ ), destacando la presencia de parafinas, sales hidratadas y mezclas eutécticas. Esta relación de materiales se recoge en la Fig. 36, elaborada por Lizana [13], según su capacidad calorífica latente y su temperatura de fusión. Esta figura incluye como referencia la capacidad calorífica del agua (línea amarilla) a diferentes temperaturas para calefacción y refrigeración. Asimismo, la Tabla 5 referencia los principales proveedores de estas soluciones comercializadas, presentada por Lizana [13], refiriendo como valor medio de coste para estos materiales los  $6\text{€/kg}$ , con una oscilación entre los  $3.6\text{€/kg}$  y los  $40\text{€/kg}$ .

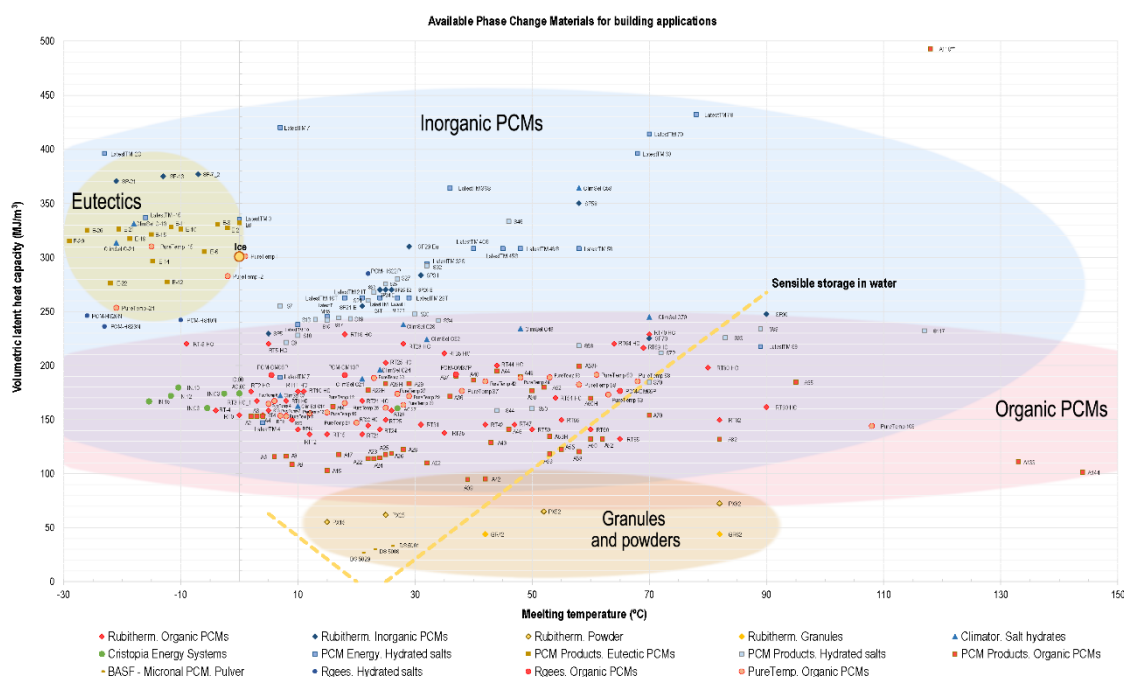


Fig. 36. Clasificación de los materiales de cambio de fase disponibles en el mercado para aplicaciones en edificación. Fuente: [49]

Tabla 5. Relación de empresas proveedoras de las soluciones comercializadas de PCMs disponibles en el mercado. Fuente: [49]

Empresa	País de origen	Clasificación de materiales	ID del producto
Rubitherm GmbH	Alemania	PCMs orgánicos – Parafinas	RT
		PCMs inorgánicos – Sales hidratadas	SP
		Polvo	PX
		Gránulos	GR
Climator	Suecia	Sales hidratadas	ClimSel C
Cristopia Energy Systems	India y Francia	Aire acondicionado	AC
		Refrigeración industrial	IN
PCM Energy	India	Sales hidratadas	Latest™
PCM Products Ltd	UK	Eutéticos bajo cero	E
		Sales hidratadas	S
		PCMs orgánicos	A
		PCMs en sales	H
		PCMs sólido-sólido	X
BASF – Micronal PCM	Alemania	Polvo	DS
RGees.savENRG™	EE.UU.	PCMs inorgánicos – Sales hidratadas	PCM-HS
		PCMs orgánicos	PCM-OM
		PCM de base natural – Ácidos grasos	-
Entropy solutions. PureTemp	EE.UU.	PCMs orgánicos	PureTemp

Para estos materiales, Lizana et al. [49] refieren un rango para la capacidad media de almacenamiento térmico latente de 300-500 MJ/m<sup>3</sup>; más concretamente, de 150-430 MJ/m<sup>3</sup> para los materiales inorgánicos disponibles y de 100-250 MJ/m<sup>3</sup> para los orgánicos. Los principales inconvenientes asociados al TES latente incluyen el alto coste de los materiales de cambio de fase, su baja conductividad térmica, su inflamabilidad y los



procesos de variación de volumen relativos al cambio de fase, así como la fiabilidad y estabilidad térmica conservada tras un gran número de ciclos de almacenamiento (carga/descarga).

Lizana et al. [49] destacan como las aplicaciones más prometedoras en almacenamiento térmico latente las aplicaciones pasivas, el PCM encapsulado en sistemas de ventilación de free cooling, y las unidades de TES de pequeña escala para almacenamiento solar, entre otras. Frente a las exigencias dimensionales de las soluciones basadas en materiales de almacenamiento térmico sensible, las aplicaciones pasivas de PCMs en soluciones constructivas permite integrar las prestaciones térmicas de estas tecnologías de TES en soluciones de menor densidad y espesor, predominantes actualmente en el sector de la edificación.

#### 4.2.2.2.1. Procesos de incorporación de PCM en materiales y soluciones de aplicación en edificación

En cuanto a los procesos de incorporación de PCM en materiales y soluciones de aplicación en edificación, se recoge una aproximación a las diferentes técnicas presentes en la literatura, en base a la revisión presentada por Mousavi et al. [53], agrupándolas en cuatro categorías: incorporación directa, inmersión, encapsulación y estabilización de forma (SSPCM).

La incorporación directa de PCM en materiales constructivos abarca técnicas de adición directa en cavidades del material y técnicas de integración en mezclas de compuestos hidratados (cemento, hormigón, yeso, entre otros). En segundo lugar, la inmersión de PCM se basa en la sumersión de un material poroso en un PCM en estado líquido con una alta temperatura a fin de que éste sea absorbido en los poros del primero. Dada la simplicidad del proceso y el reducido equipo necesario, Mousavi et al. [53] destacan este método como el modo más económico de incorporar PCM en la edificación, dado que, como señala Oliver [52], estaría permitiendo convertir cualquier solución constructiva en una solución con PCM incorporado. No obstante, tanto la inmersión como la incorporación directa presentan importantes limitaciones y riesgos persistentes dada las fugas de PCM fundido en la solución, su alta inflamabilidad, su carácter corrosivo y su incompatibilidad con materiales constructivos [53].

Por su parte, la encapsulación de PCM surge con el objetivo de solventar las limitaciones y desventajas que los materiales de cambio de fase muestran en las técnicas por contacto directo con el material constructivo [52], presentando soluciones efectivas para mejorar la conductividad térmica de los PCMs y para eliminar los riesgos de fuga, corrosión e inflamabilidad [53]. La encapsulación abarca aquellas técnicas de revestimiento y contención del material de cambio de fase en estado puro dentro de recipientes, cápsulas o películas poliméricas de diversa naturaleza, que han de ser compatibles tanto con el PCM como con el material constructivo donde se incorpore [52]. Según el diámetro de estas cápsulas contenedoras de un núcleo de PCM, se puede distinguir, a su vez, entre tres tipos de encapsulación [52,53]: macroencapsulación, referida a aquellas con un diámetro de entre 1 cm y 1 mm; microencapsulación, que abarca los diámetros incluidos entre 1 mm y 1  $\mu\text{m}$ ; y nanoencapsulación, para aquellas microcápsulas con un diámetro inferior a 1  $\mu\text{m}$ .

Para este proceso, Mousavi et al. [53] apuntan como factores críticos la geometría y el tamaño de la encapsulación, el espesor de la cápsula o película, y el material de la cápsula contenedora. Asimismo, frente a la macroencapsulación, destacan las técnicas de

microencapsulación y nanoencapsulación de PCMs por su mayor estabilidad durante los ciclos térmicos, su volumen relativamente constante, sus mayores índices de intercambio de calor (como consecuencia de una mayor área de transferencia) y sus mayores facilidades de aplicación al no requerir de protección frente a la destrucción. No obstante, se precisan investigaciones ulteriores sobre limitaciones persistentes como su efecto en las prestaciones mecánicas de las soluciones constructivas, entre otras [53].

Finalmente, los denominados PCMs estabilizados en forma (SSPCMs) se basan en la estabilización del material de cambio de fase mediante su dispersión dentro de materiales o compuestos base que funcionan como matriz porosa, con el objetivo de fabricar un material compuesto estable que pueda ser integrado en soluciones constructivas de la edificación [52,53]. Los materiales porosos seleccionados a tal fin pueden ser inorgánicos u orgánicos, destacando los minerales arcillosos y el polietileno de alta densidad (HDPE), respectivamente, en la fabricación de SSPCM [53]. Las principales ventajas de este proceso de incorporación incluyen una adecuada conductividad térmica, una elevada capacidad calorífica, un buen comportamiento térmico a largo plazo, una buena estabilidad de forma durante los procesos de cambio de fase y un coste relativamente bajo, entre otras. Oliver [52] señala que, en base a los resultados de las investigaciones, este relativamente reciente proceso de incorporación y fabricación de compuestos de PCM constituye una técnica prometedora para soluciones de aplicación en edificación.

#### 4.2.2.2. Criterios de selección de materiales de cambio de fase (PCMs) en aplicaciones para edificación

Dado que ninguno de los materiales de cambio de fase revisados cumple las prestaciones necesarias para las aplicaciones en edificación de una manera óptima, el proceso de selección de PCMs para soluciones de TES de aplicación en la edificación exige de una revisión de los criterios clave a fin de seleccionar un material o compuesto apropiado. Para ello, se revisan los criterios de selección de PCMs para aplicaciones en edificación presentados por Mousavi et al. [53]. En primer lugar, la temperatura de fusión del PCM debe encontrarse dentro del rango de confort correspondiente al caso de estudio, además de mantener la temperatura interior a un nivel deseable. En segundo lugar, el PCM seleccionado debe contar con una elevada capacidad calorífica aparente, a fin de asegurar una densidad energética suficiente en el almacenamiento térmico. En tercer lugar, la conductividad térmica del PCM debe ser lo suficiente alta para garantizar un índice eficiente de regeneración. Finalmente, se encuentra preferible un PCM con unos cambios volumétricos mínimos durante el cambio de fase. Además de esta serie de criterios termofísicos, en [53] se destaca la conveniencia de materiales que no sean inflamables, ni explosivos, ni tóxicos, ni contaminantes, ni corrosivos, que, asimismo, presenten una alta disponibilidad, un bajo coste, una fiabilidad térmica y una estabilidad cíclica (referida a los ciclos de carga/descarga de almacenamiento).

#### 4.2.2.3. Almacenamiento termoquímico

Finalmente, el método de almacenamiento termoquímico se puede basar en el intercambio de energía requerido para inducir una reacción química reversible, produciéndose una reacción endotérmica cuando absorbe dicha energía térmica (fase de carga) y exotérmica cuando la libera (fase de descarga) (ver **Fig. 33**). Estas reacciones químicas implican un cambio en los enlaces químicos de la sustancia (disociación y recombinación). Este método

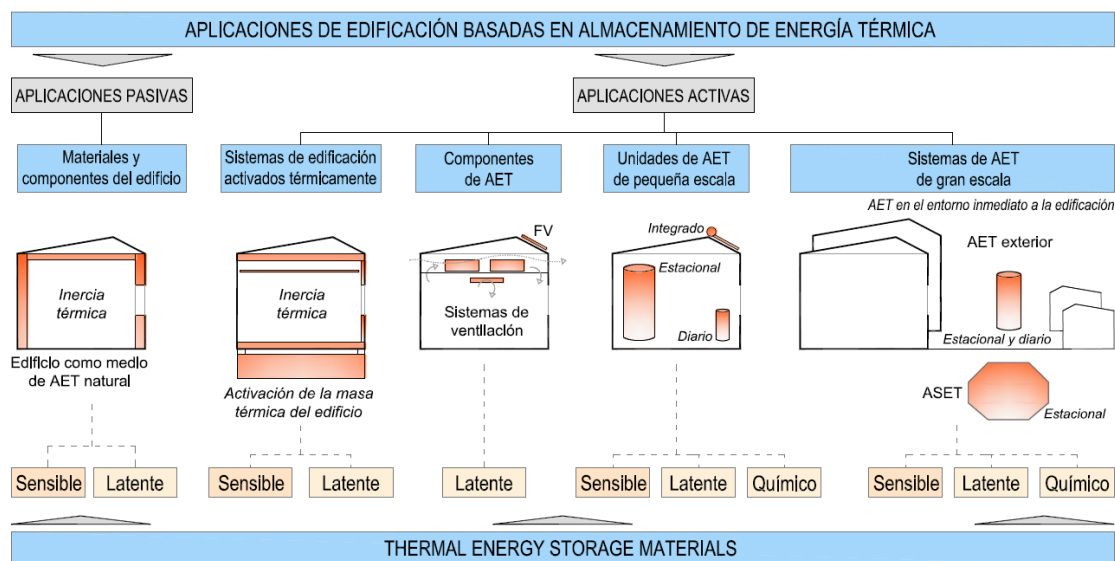
de almacenamiento también puede basarse en procesos de sorción, que suponen la fijación o captura de un gas (denominado sorbato) por una sustancia sorbente en estado condensado (sólido o líquido). Tatsidjodoung et al. [54] recogen una descripción detallada de los procesos relativos a este método y analizan comparativamente materiales termoquímicos (denominados TSMs) potencialmente aplicables a la edificación. Yu et al. [55] proporcionan un revisión de la terminología y una clasificación detallada de procesos de sorción desarrollados en relación a sistemas de TES.

Lizana et al. [49] señalan que, si bien aún presenta numerosas limitaciones asociadas a su aplicación en edificación, este método presenta potenciales ventajas dada su elevada capacidad de almacenamiento térmico (con un valor medio aproximado de 1000 MJ/m<sup>3</sup> según [54]) durante largos períodos de tiempo. No obstante, el almacenamiento termoquímico cuenta con importantes inconvenientes como un coste elevado y unas temperaturas de operación inapropiadas para su aplicación en edificación, entre otros.

#### 4.2.3. Aplicaciones de almacenamiento de energía térmica para edificación

En su tesis sobre soluciones avanzadas de almacenamiento y gestión de la energía térmica [13], Lizana presenta una clasificación global de las aplicaciones de almacenamiento de energía térmica para edificación, junto a las técnicas de implementación asociadas.

Un primer nivel de la estructura de esta clasificación distingue dos tipos de aplicaciones en función del modo de intercambio de calor: aplicaciones pasivas y aplicaciones activas (ver **Fig. 37**). Las aplicaciones activas se basan en procesos de convección forzada o de transferencia de masa asistida por componentes o sistemas mecánicos. Por su parte, las aplicaciones pasivas, que corresponde al objeto del presente trabajo, se caracterizan por unos procesos de intercambio de calor (carga y descarga) en los que se prescinde de la contribución de cualquier componente o sistema mecánico. Estas aplicaciones se basan, por tanto, en técnicas de convección natural o de diferencias de temperatura.



**Fig. 37.** Clasificación de las aplicaciones de almacenamiento de energía térmica para edificación, junto a los métodos de almacenamiento de materiales aplicables en cada caso. Fuente: [51]

Un segundo nivel de la clasificación [13] agrupa las aplicaciones de almacenamiento de energía térmica para edificación en cinco grupos según las tecnologías y las técnicas de implementación asociadas: sistemas de TES en materiales y soluciones propias del edificio; sistemas de edificación activados térmicamente (TABS); sistemas de soluciones de TES; sistemas de unidades de TES de pequeña escala; y sistemas de TES de gran escala (ver **Fig. 37**).

Los sistemas de TES en materiales y soluciones propias del edificio se basan en aplicaciones de elementos con una gran inercia térmica asociada [13], los cuales, como ya se presentó en el subapartado 4.2.1, mejoran el comportamiento térmico de los edificios amortiguando las fluctuaciones de temperatura en los espacios interiores. Estas aplicaciones sólo abarcan materiales de almacenamiento térmico sensible y latente [13].

Por su parte, los denominados sistemas de edificación activados térmicamente (TABS) o de activación de la masa térmica (TMA) se refieren, según Lizana [13], a aplicaciones activas que emplean la estructura de la edificación como sistema de almacenamiento de energía térmica. Estas aplicaciones operan conectando un elemento constructivo con una elevada capacidad de almacenamiento térmico a una fuente de energía térmica. Estas aplicaciones sólo abarcan materiales de almacenamiento térmico sensible y latente [13].

Los sistemas de soluciones de TES se basan en la aplicación en la edificación de materiales de cambio de fase (PCMs) encapsulados, los cuales, en especial colaboración con la ventilación nocturna, funcionan como sistemas de free cooling, dotando de gran inercia térmica a los espacios interiores gracias a su capacidad de almacenamiento térmico latente, y mejorando el comportamiento de los demás sistemas. Lizana [13] clasifica, a su vez, las aplicaciones de PCMs en edificación en dos grupos principales: las aplicaciones de PCMs a sistemas de ventilación para estrategias de free cooling y las aplicaciones de PCMs a paneles fotovoltaicos para aumentar su rendimiento eléctrico por la minoración del aumento de temperatura de su superficie.

En cuanto a los sistemas de unidades de TES de pequeña escala, estos se refieren, según Lizana [13], a aplicaciones de calefacción y refrigeración de tanques de almacenamiento compactos, para aumentar el uso de energía renovable mediante el almacenamiento estacional o diario, o para mejorar el rendimiento energético de sistemas de acondicionamiento activo. Estas aplicaciones abarcan métodos de almacenamiento térmico sensible, latente y termoquímico [13].

Por último, los sistemas de TES de gran escala abarcan aplicaciones de almacenamiento de energía solar para redes de calefacción urbana o edificios de gran escala, mediante tanques de agua a gran escala sobre el suelo o sistemas de almacenamiento subterráneo de energía térmica (UTES) [13].

### **4.3. Soluciones de almacenamiento de energía térmica basadas en arcilla**

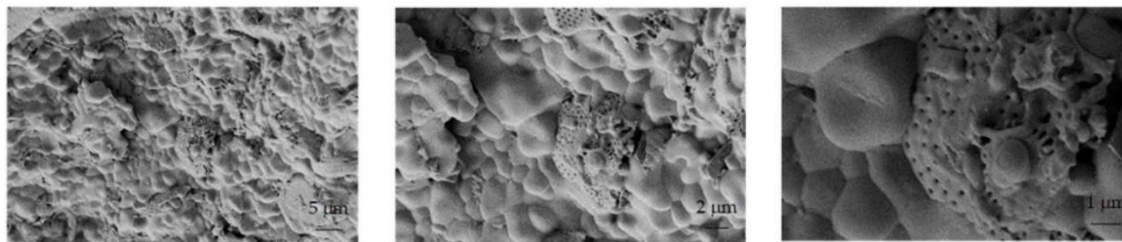
En este apartado, dados los objetivos del presente trabajo de investigación, se concluye con una revisión de las líneas de desarrollo abiertas sobre soluciones basadas en arcilla que integren materiales de cambio de fase en su propuesta como tecnologías avanzadas de almacenamiento de energía térmica para su aplicación en la edificación. En base a la literatura actualmente disponible y accesible sobre estas líneas, las soluciones de TES basadas en arcilla revisadas se pueden agrupar principalmente en dos categorías: soluciones de estabilización de forma de materiales de cambio de fase (SSPCM) y

soluciones avanzadas de construcción con materiales arcillosos mediante la incorporación de PCM microencapsulado. Si bien la primera está compuesta por una amplia variedad de estrategias y soluciones de encapsulación de materiales de cambio de fase estabilizados mediante el uso de las arcillas como matriz porosa; la segunda categoría con propuestas de soluciones constructivas avanzadas, que corresponde propiamente al objeto de la investigación, incluye aún referencias muy escasas.

#### 4.3.1. Soluciones de estabilización de forma de materiales de cambio de fase (SSPCM) a base de minerales arcillosos

La primera categoría incluye técnicas y soluciones de incorporación y estabilización de materiales de cambio de fase para la fabricación de los denominados PCMs estabilizados en forma (SSPCMs). Como ya se refirió en el apartado anterior, estas soluciones se basan en la impregnación o dispersión del material de cambio de fase en microcontenedores elaborados con minerales arcillosos a fin de estabilizar la forma del PCM durante los procesos de cambio de fase y evitar fugas de material en la solución constructiva donde se incluyan [23]. Las propiedades intrínsecas de las arcillas, como su estructura porosa, su prominente área de superficie y su consecuente capacidad de absorción, presentan potenciales ventajas a tal fin [22,23].

Lv et al. [22] llevan a cabo una extensa revisión de las soluciones de encapsulación de SSPCM a base de arcilla presentadas en la literatura, agrupándolas según los minerales arcillosos empleados como contenedor y destacando la abundancia de soluciones propuestas en las que se emplea la caolinita, la diatomita, la sepiolita, la montmorillonita, la perlita, el óxido de silicio o sílice, la atapulgita, la vermiculita y las cenizas voladoras, principalmente. Esta revisión incluye para cada caso la caracterización mineralógica del mineral arcilloso, los métodos de modificación de éste, los procesos de preparación del PCM y la caracterización de la solución de SSPCM resultante. En [22] se concluye que la estabilización del PCM mediante minerales arcillosos resulta efectiva en la prevención de fugas de material, si bien la capacidad calorífica latente y la temperatura de cambio de fase se verá influenciada por las interacciones entre el PCM y los minerales arcillosos dentro del compuesto.



**Fig. 38.** Imagen por microscopia electrónica de barrido de emisión de campo (FESEM) de una solución de SSPCM, conformada a base de minerales de diatomeas y de una mezcla eutéctica como material de cambio de fase. Fuente: [56]

Del mismo modo, Voronin et al. [23] recogen los recientes avances en la preparación de compuestos basados en microcontenedores de arcilla impregnados con PCM, señalando la intensa labor de investigación en este campo, aunque con un escaso desarrollo en aplicaciones finales. Asimismo, destacan la importancia del uso de minerales arcillosos como materiales de contención prometedores, especialmente para la mejora de las tecnologías basadas en compuestos inorgánicos, aunque advierten de la necesidad de

nuevas investigaciones para la mejora de ciertas limitaciones persistentes en estas soluciones de SSPCM. Finalmente, subrayan la emergencia de líneas de desarrollo de soluciones de SSPCM a base de arcilla con propiedades multifuncionales, como las denominadas soluciones de PCHCMs para el control simultáneo de la temperatura y la humedad, entre otras.

#### 4.3.2. Soluciones avanzadas de construcción con materiales arcillosos mediante la incorporación de PCM microencapsulado

En cuanto a la segunda categoría de soluciones constructivas avanzadas, las líneas de investigación y desarrollo se presentan muy escasas y recientes, incluyendo el mercado de soluciones comercializadas para su aplicación en edificación; reservándose estas últimas para el análisis comparativo presentado en el subapartado correspondiente del capítulo 5 del presente trabajo. Las soluciones revisadas en la literatura se focalizan, principalmente, en la descripción del proceso de preparación, en cuanto a materiales y métodos, y en la caracterización de las propiedades de la solución avanzada para su análisis comparativo con las de los materiales empleados en la composición o con otras soluciones constructivas tradicionales basadas en los mismos materiales constituyentes, cuya caracterización se realiza en la misma investigación o se extrae de otras referencias en la literatura. Los análisis adicionales sobre el ciclo de vida de las soluciones propuestas constituyen aproximaciones de gran interés para futuras investigaciones.

Serrano et al. [57] desarrollan y caracterizan una solución avanzada de tierra apisonada con PCM microencapsulado con el objetivo de optimizar las prestaciones mecánicas y térmicas de esta solución constructiva tradicional. La metodología de desarrollo incluye la fabricación y caracterización experimental de tres muestras diferentes de solución. Cada muestra se compone de una mezcla de arcilla (42.5%), arena (50%) y grava (7.5%), y se estabiliza mediante la adición de paja, fibras neumáticas, cal o alabastro, según la formulación establecida para cada una (ver **Fig. 39**). Se selecciona como PCM microencapsulado la solución comercializada Micronal® DS 5001, caracterizada por un rango de temperatura de fusión de 10-30°C y una capacidad de almacenamiento térmico de 110 kJ/kg. Los objetivos de la caracterización incluyen, en primer lugar, la cuantificación de las variaciones en las propiedades mecánicas de las muestras a fin de optimizar la concentración de los materiales de estabilización y del PCM microencapsulado. En segundo lugar, las muestras optimizadas se caracterizan térmicamente siguiendo procesos experimentales.

Los resultados finales de la caracterización mecánica de las muestras en [57] señalan que el PCM microencapsulado no estaría afectando a las propiedades mecánicas de la solución constructiva, aunque la combinación del PCM con materiales de estabilización como la cal o el alabastro tiende a cumplir o mejorar estas propiedades. Por su parte, los resultados de la caracterización térmica muestran, por un lado, que la conductividad térmica de las muestras disminuye con la adición de PCM, lo cual se debe a la baja conductividad térmica de los materiales constituyentes del PCM (parafinas en microcápsulas poliméricas). Por otro lado, se observa que las temperaturas resultantes en las muestras de solución que incorporan PCM microencapsulado se encuentran atenuadas respecto a las muestras de solución sin PCM, mientras que la capacidad calorífica aumenta con la adición de PCM. [57] señala que esto constituye un comportamiento coherente en materiales con PCM incorporado, dado el calor latente añadido por el PCM a la capacidad de almacenamiento térmico de la solución.



**Fig. 39.** Muestra fabricada para la caracterización experimental de la solución avanzada de tierra apisonada con PCM microencapsulado. Fuente: [57]

Alsaad et al. [58] presentan una solución avanzada a base de arcillas y limos con PCM microencapsulado y desarrollan estudios experimentales sobre sus propiedades mecánicas, higroscópicas y térmicas, a fin de combinar las prestaciones higrotérmicas de la tierra aligerada con la capacidad de almacenamiento térmico añadida de los materiales de cambio de fase. La metodología consta de una primera fase de fabricación de cinco muestras diferentes de solución, distinguidas en base a la concentración de PCM microencapsulado (0%, 2%, 5%, 10% y 20%) (ver **Fig. 40**); y de una segunda fase de caracterización siguiendo métodos experimentales. Cada muestra se compone de una mezcla de arcillas y limos estabilizada con fibras vegetales de caña.

Una vez analizadas las condiciones climáticas y de confort térmico de la localización donde se desarrollarán los ensayos, la selección del PCM se basa en los criterios que siguen: la entalpía de fusión, las propiedades químicas y, especialmente, la temperatura de fusión. Asimismo, en cuanto al tipo de presentación del PCM, se opta por la microencapsulación dadas sus ventajas en cuanto a la superficie de transferencia de calor del material y a la prevención de fugas durante los procesos de cambio de fase. Se selecciona como PCM microencapsulado la solución comercializada Nextek® 24D, caracterizada por una densidad de 300-400 kg/m<sup>3</sup>, una temperatura de fusión de 24°C y una capacidad de almacenamiento térmico de 170 kJ/kg. La caracterización experimental de cada muestra incluye el análisis de su comportamiento mecánico, térmico (conductividad térmica y capacidad calorífica) e higroscópico (absorción de humedad, porosidad, permeabilidad al vapor de agua).

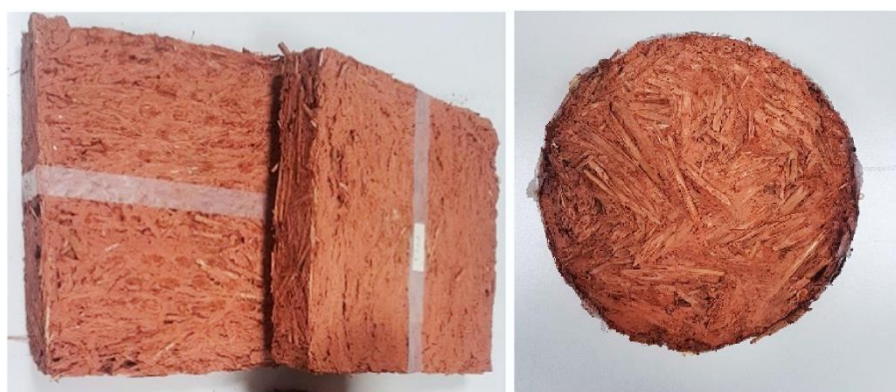
Los resultados de la caracterización higroscópica muestran que la cantidad de vapor de agua absorbido del ambiente depende notablemente de la presencia del material fibroso, además de ser inversamente proporcional a la concentración de PCM microencapsulado. Este descenso en la cantidad de humedad absorbida por la solución, proporcional al porcentaje de PCM incorporado, se explica por el carácter hidrofílico de los materiales constituyentes del PCM (parafinas en microcápsulas poliméricas). [58] advierte que, si bien las prestaciones higroscópicas de la solución arcilla-limo se ven reducidas con la adición de PCM, éstas aún se mantienen por encima de otras soluciones convencionales como aquellas basadas en cemento. La rápida respuesta de los materiales basados en arcilla a los cambios en la humedad relativa constituye probablemente una de las propiedades más importantes para la regulación de la humedad en espacios interiores y, con ello, para la



prevención de patologías por condensaciones superficiales. Los resultados también muestran una reducción en la porosidad de las muestras con la adición de PCM microencapsulado, lo cual [58] atribuye a la saturación de poros que se derivaría de la incorporación de las microcápsulas de PCM; y, como consecuencia, una reducción en la permeabilidad al vapor de agua, si bien se mantiene el carácter higroscópico de los componentes arcillosos.

Por su parte, los resultados de la caracterización térmica en [58] señalan, por un lado, que la conductividad térmica de la muestra sin PCM (0%) se incrementa con el aumento de la temperatura, lo cual supone un comportamiento coherente. Por el contrario, las variaciones en la conductividad térmica de las muestras con PCM, así como su índice de aumento o reducción, se relaciona con la concentración de PCM y el rango de temperaturas en el que se produce el cambio de fase. [58] confirma que la adición de PCM microencapsulado en la solución mejora las propiedades aislantes de la solución arcilla-limo en función del porcentaje de concentración y la temperatura. Por otro lado, los resultados de la capacidad calorífica muestran que, en general, la capacidad calorífica de la solución aumenta linealmente con la adición de PCM. La curva que representa el aumento de la capacidad calorífica en el rango de temperaturas que abarca el cambio de fase del PCM se explica teniendo en cuenta que, dentro de este rango, la capacidad calorífica de la solución resulta de la combinación del calor sensible con el calor latente almacenado por el PCM durante el cambio de fase.

En cuanto a los resultados de la caracterización mecánica, Alassaad et al. [58] advierten que los efectos de la adición de PCM en la resistencia mecánica de la solución constructiva son prácticamente inexistentes, y se señala como un resultado coherente dada la alta porosidad de los materiales constituyentes de la mezcla. Asimismo, dado que la aplicación final de esta solución avanzada corresponde a soluciones no portantes con funciones higrotérmicas, una baja resistencia a compresión no constituiría una limitación para su implementación.



**Fig. 40.** Muestras fabricadas para los ensayos de caracterización térmica y de permeabilidad al vapor de agua de la solución avanzada de arcilla-limo con PCM microencapsulado. Fuente: [58]



## 5. Caracterización material y desarrollo de nuevas soluciones constructivas

En el marco de este campo de tecnologías basadas en materiales prometedores para la mejora del comportamiento térmico de los edificios, se procede a la presentación y determinación de las propiedades físico-térmicas de una propuesta de solución constructiva arcilla-PCM siguiendo, para ello, procesos de caracterización físico-térmica por metodología experimental y cálculo numérico. Esta propuesta se presenta como prototipo para ampliar las líneas de investigación sobre la caracterización metodológica de soluciones híbridas arcilla-PCM, que, mediante ensayos ulteriores de caracterización, puedan derivar en criterios óptimos para la fabricación e implementación de soluciones constructivas innovadoras basadas en arcilla y materiales de cambio de fase, como tecnologías avanzadas de TES para el acondicionamiento de espacios interiores.

A pesar de la vocación de trabajo práctico (como así lo reflejan los ensayos desarrollados para la caracterización experimental de las arcillas), la implementación de medidas excepcionales por la pandemia COVID-19 ha obligado a limitar los procesos de preparación de muestras y caracterización del panel a su estudio teórico, un estudio que, no obstante, se enfoca a futuras investigaciones donde se aborden metodologías experimentales complementarias.

### 5.1. Materiales

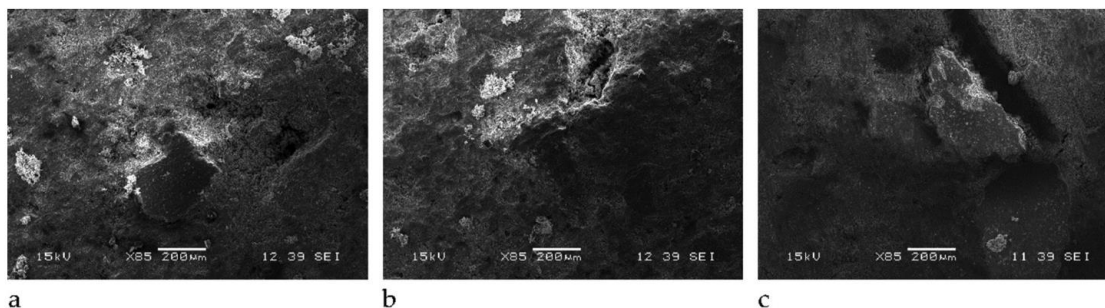
#### 5.1.1. Arcilla estabilizada

Para la propuesta de solución constructiva de panel arcilla-PCM, se seleccionan, en primer lugar, las muestras de arcillas preparadas y caracterizadas según los ensayos pertinentes en [59]. Las arcillas empleadas, provistas por el Centro Tecnológico de la Cerámica INNOVARCILLA [60], proceden del área de Bailén, municipio de la provincia de Jaén (Andalucía), donde son empleadas como materia prima en las labores de alfarería de la localidad.

La caracterización de las arcillas para su estudio experimental como material constructivo en [59] ha permitido determinar no sólo su composición química y mineralógica, sino también sus propiedades mecánicas, acústicas y térmicas, permitiendo llevar a cabo una lectura conjunta y cruzada en el análisis de los resultados. Para la consecución de los ensayos, las arcillas adquiridas fueron sometidas a un proceso de secado y molienda para reducir su presentación a un polvo de entre 1 mm y 200  $\mu\text{m}$ . Para la clasificación de las mismas, se designan en base al color que presentan por su composición, pudiendo

distinguir entre tres tipos de arcillas (entre paréntesis se refiere el código de laboratorio asignado): arcilla roja (SR), arcilla amarilla (SY) y arcilla negra (SB).

Su composición química y mineralógica, así como su clasificación en función de los límites de Atterberg, se determinaron empleando la difracción de rayos X (ver **Tabla 6**) con un difractómetro de muestras de polvo Malvern Panalytical Empyrean (XRD), siguiendo los métodos de análisis ASTM D 422 y ASTM D 4318 [59].



**Fig. 41.** Imágenes por microscopía electrónica de barrido (SEM) de las tres arcillas, a) arcilla roja (SR), b) arcilla amarilla (SY), y c) arcilla negra (SB). Fuente: [59]

**Tabla 6.** Composición química y características físicas de las tres arcillas (SR, SY, SB). Fuente: [59]

Tipo de arcilla		SR	SY	SB	
<b>Análisis químico (a granel) (%) en peso</b>	SiO <sub>2</sub>	58.5	56.6	54.2	
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.7	12.1	12.3	
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.0	4.2	4.3	
	MnO	0.1	0.0	0.1	
	MgO	2.8	2.2	2.1	
	CaO	2.2	9.1	10.4	
	Na <sub>2</sub> O	0.2	1.7	1.4	
	K <sub>2</sub> O	5.0	3.1	2.9	
	TiO <sub>2</sub>	0.8	0.0	0.7	
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.2	0.0	0.1	
	L.O.I.	0.08	10.8	12.2	
<b>Composición mineralógica</b>	Minerales arcillosos (%)	Q	32	40	43
		Fd	5	tr.	3
		C	tr.	15	18
		D	10	tr.	4
		FI	53	45	32
	Filosilicatos (<2 μm) (%)	Sm	Ud.	40	32
		Ill	66	60	58
		Ka	33	Ud.	10
		Ch	tr.	tr.	Ud.
P	Ud.	Ud.	Ud.		
<b>Distribución granulométrica</b>	Rechazos a 63 μm (obtenidos por tamizado húmedo) (%)	51.1	23.8	43.8	
<b>Límites de Atterberg</b>	Límite líquido (%)	25.6	32.8	38.8	
	Límite plástico (%)	14.1	11.1	18.6	
	Índice de plasticidad (%)	11.5	21.7	20.2	

Para la estabilización de la arcilla, en base a la investigación previa realizada, en [59] se seleccionan el alginato y la fibra natural de lana por sus beneficios como estabilizantes de materiales constructivos a base de tierra [61]. El alginato es un polímero natural que no

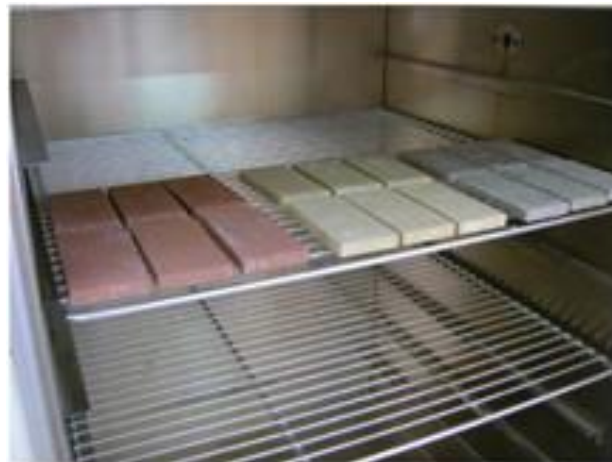
sólo contribuye a la flexibilidad y la resistencia, sino que también mejora la viscosidad y la capacidad de retención de agua [59]. Del mismo modo, la fibra de lana actúa como refuerzo para la estabilización de la emulsión, proporcionando cohesión a las partículas minerales [59,62]. El alginato seleccionado ha sido la formulación denominada CIMALGIN HS4, provisto por CIMAPREM [63], consistente en un polvo blanco grisáceo [59]. Por su parte, como fibra natural de refuerzo se selecciona la lana de oveja, obtenida a partir de excedentes agrícolas estimados como residuos, los cuales han sido tratados de manera previa a la preparación de las muestras, tal y como se detalla en [59].

Para la preparación de las muestras de los tres tipos de arcilla (SR, SY, SB), se mezclan los componentes en los porcentajes detallados en la **Tabla 7**, los cuales se determinan en base a los resultados recogidos en investigaciones previas [59,61].

**Tabla 7.** Cantidad y porcentaje de los componentes para la preparación de las muestras de las tres arcillas (SR, SY, SB). Fuente: [59]

Componente de la muestra	Cantidad (gr)	%
Arcilla (roja, amarilla o negra)	3070	76.75
Alginato	120	3.00
Fibra de lana de oveja	10	0.25
Agua	800	20.00

Una vez preparadas las muestras, se moldean y prensan las piezas (ver **Fig. 42**) para los ensayos con la forma de bloques de tierra estabilizada comprimida (BTEC) en una variedad de dimensiones determinadas, según se detalla en [59]. De manera previa a los ensayos programados, las piezas fueron conservadas a temperatura ambiente para su curado durante un total de 28 días. Los resultados de la totalidad de los ensayos llevados a cabo en [59] para los tres tipos de arcilla (SR, SY, SB) se recogen conjuntamente en la **Tabla 8**.



**Fig. 42.** Piezas de tierra estabilizada comprimida preparadas en [59] para los ensayos de cada arcilla (SR, SY, SB). Fuente: [59]

**Tabla 8.** Resultados principales de los ensayos llevados a cabo para las tres arcillas (SR, SY, SB). Fuente: [59]

Análisis	Valor asignado	Muestra de arcilla		
		SR	SY	SB
<b>Densidad</b>	Densidad aparente en seco (kg/m <sup>3</sup> )	1510 (±90)	1450 (±80)	1390 (±130)
<b>Caracterización térmica</b>	Conductividad térmica (W/mK)	0.53	0.68	0.61
<b>Caracterización acústica</b>	Pérdida de transmisión (dB)	X + 2	X + 4	X
	Frecuencia de resonancia (Hz)	448	440	440
<b>Módulo de Young</b>	Módulo de elasticidad dinámico (GPa)	28.4	30.4	-
<b>Ensayos mecánicos</b>	Resistencia a compresión (MPa)	3.85	3.79	1.70
	Resistencia a flexión (MPa)	0.91	0.86	0.39
<b>Estructura interna</b>	Volumen total de intrusión (ml/g)	0.2120	0.2109	0.2216
	Área total de poros (m <sup>2</sup> /g)	14.681	7.322	6.825
	Diámetro de poro (volumen) (nm)	528.7	789.9	713.2
	Diámetro de poro (área) (nm)	14.4	17.5	19.7
	Diámetro medio de poro (nm)	57.8	115.2	129.9
	Densidad aparente (a 0,0345 MPa) (g/ml)	1.7043	1.6986	1.4803
	Densidad esquelética (g/ml)	2.6737	2.6496	2.2055
	Porosidad (%)	36.18	35.85	32.83
<b>Humedad</b>	Humedad (Base húmeda) (%)	2.91	2.68	2.47
	Humedad (Base seca) (%)	3.00	2.75	2.53
<b>Capacidad calorífica</b>	Poder calorífico superior (Base seca) (Kcal/kg)	17.14	71.95	102.74
	Poder calorífico inferior (Base húmeda) (Kcal/kg)	16.64	70.02	100.20

### 5.1.2. PCM microencapsulado

El material de cambio de fase seleccionado para la propuesta de panel ha sido la solución de PCM microencapsulado Micronal® 28D, en polvo seco, comercializada por Microtek Laboratories, Inc. [64]. Esta solución consta de un núcleo de parafina, de dimensiones micrométricas, que funciona como almacenador de calor latente, encerrado dentro de microcápsulas selladas, fabricadas con polímeros de polimetacrilato altamente reticulados como material de revestimiento [65,66] (ver **Fig. 43**).



**Fig. 43.** Solución de PCM microencapsulado Micronal® 28D en polvo seco. Fuente: [67]

Como ya se estudió en el capítulo 4, la parafina ha sido extensamente empleada en materiales constructivos para la mejora de la eficiencia energética de los edificios por las ventajas y garantías que ofrece en los procesos de almacenamiento de energía térmica [66,68]. Su reducido peso y volumen le confiere una gran versatilidad formal para su integración en soluciones constructivas diversas [69], ser incorporada como aditivo y mezclada directamente con el resto de componentes durante el proceso de fabricación de soluciones mejoradas [66,70].

Por otro lado, la reticulación del material de revestimiento proporciona un sistema de contención seguro para la conservación de la pureza (y, con ello, de la capacidad calorífica) de la parafina frente a las variaciones de volumen por cambio de fase durante décadas [65]. Dicho cambio de fase (fusión-solidificación) opera dentro del rango de confort para las temperaturas operativas de espacios interiores en períodos estivales [65]. Así, este proceso de microencapsulación proporciona y garantiza una elevada capacidad de almacenamiento a lo largo de los ciclos, conservando la impenetrabilidad, el punto de fusión y la capacidad calorífica en su nivel inicial con la sucesión de los ciclos de carga y descarga [65]. Así lo indican los análisis reportados por BASF en [65] (empresa proveedora de los productos Micronal® hasta 2017 [71]), confirmados por las mediciones del Instituto Fraunhofer para Sistemas de Energía Solar (ISE) de Freiburg [65] y certificados desde 2008 por la Asociación de Calidad de PCM RAL (Gütegemeinschaft PCM e.V) [66].

Las características físicas del PCM microencapsulado Micronal® 28D se recogen en la **Tabla 9**, en base a la información proporcionada por Microtek Laboratories, Inc. en la documentación técnica de sus productos [64,65,67].

**Tabla 9.** Características físicas del PCM microencapsulado Micronal® 28D

<b>Apariencia</b>	Color blanco a ligeramente blanquecino
<b>Forma física</b>	Polvo seco (> 98% sólido)
<b>Tamaño de partícula (medio)</b>	ca. 50-400 $\mu\text{m}$
<b>Densidad aparente</b>	ca. 300-400 $\text{kg}/\text{m}^3$
<b>Temperatura de fusión</b>	28°C $\pm$ 2°C
<b>Entalpía de fusión</b>	150 kJ/kg

### 5.1.3. Panel arcilla-PCM: preparación y muestras del prototipo

El panel arcilla-PCM se configura como un panel compuesto a base de arcilla estabilizada con aditivos naturales y de una solución de parafina microencapsulada en polvo seco como material de cambio de fase para su implementación en soluciones constructivas destinadas a espacios interiores. La propuesta de panel derivada de estos estudios se presenta como prototipo para investigaciones ulteriores sobre los criterios óptimos en la fabricación e implementación de soluciones constructivas basadas en arcilla, que incorporen materiales de cambio de fase, para el acondicionamiento pasivo de espacios interiores mediante estrategias de almacenamiento de energía térmica.

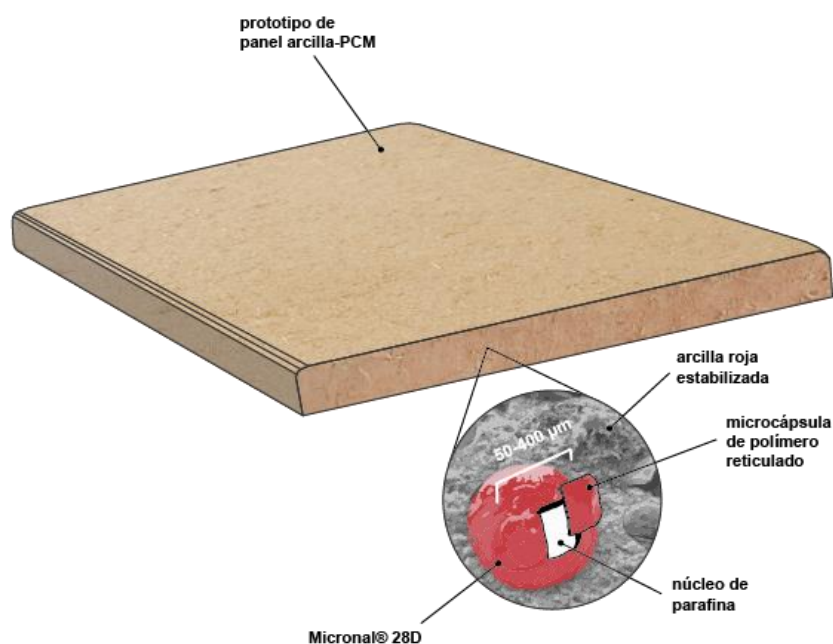


Fig. 44. Prototipo de panel compuesto arcilla-PCM

Con este fin, se desarrollan para su caracterización y evaluación térmica tres variantes del prototipo de panel, en función de la fracción de masa (% m/m) de PCM microencapsulado integrada en el compuesto, según la ecuación (1). La **Tabla 10** recoge las muestras del prototipo preparadas hipotéticamente con una proporción variable de PCM microencapsulado, incluyendo un panel de arcilla estabilizada sin PCM (panel de referencia), en base a la siguiente nomenclatura: arcilla+0%PCM, arcilla+10%PCM, arcilla+15%PCM y arcilla+20%PCM.

$$\%masa = \frac{masa\ de\ componente\ (gr)}{masa\ de\ compuesto\ (gr)} \cdot 100 \quad (1)$$

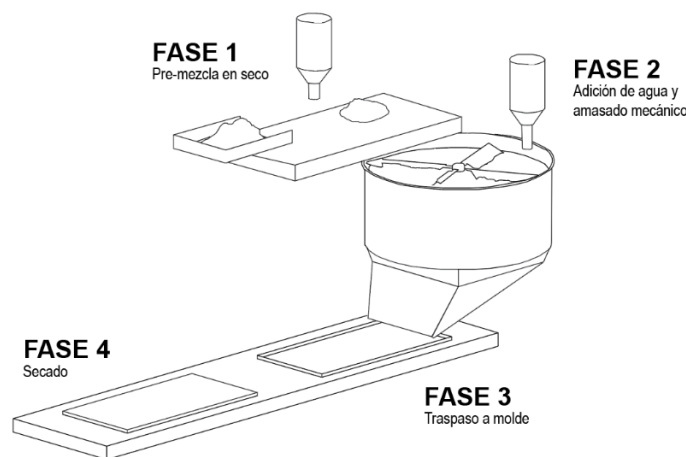
La fracción de masa (% m/m) de PCM microencapsulado integrada en el compuesto para cada variante se oscila entre el 10% y el 20%, un valor conservativo considerando los ensayos realizados y los valores recomendados en la literatura consultada [66,72] sobre la concentración máxima de PCM microencapsulado en soluciones constructivas. Para confirmar la conveniencia de estas concentraciones de PCM microencapsulado en el prototipo, será necesario llevar a cabo análisis complementarios que evalúen las prestaciones mecánicas del panel arcilla-PCM y verifiquen el cumplimiento de las exigencias relativas a tal solución constructiva para su aplicación final. La documentación técnica proporcionada por el fabricante de Micronal® no recomienda añadir el material de cambio de fase a sistemas basados en yeso en concentraciones superiores al 30% [64,65]. Bake et al. [66] limitan por debajo del 30% la adición del PCM microencapsulado Micronal en las muestras para la caracterización experimental del panel. Jaworski [72] señala que la concentración de materiales de cambio de fase orgánicos en paneles y bloques de hormigón debe ser inferior al 30% a fin de garantizar las propiedades mecánicas y de resistencia al fuego del panel final.

Por otro lado, la determinación del espesor del prototipo de panel se ha basado en el análisis de las dimensiones correspondientes a las soluciones constructivas destinadas a espacios interiores (comercializadas o desarrolladas en la literatura revisada), referenciadas en el subapartado 5.3.2 sobre la comparación del prototipo con otras soluciones. Así, se establece un espesor inicial de 0.02 m para el panel arcilla-PCM con el fin de desarrollar una solución constructiva que pueda resultar competitiva en su análisis comparativo con las soluciones existentes, que cuentan con un espesor aproximado para la misma función. En cualquier caso, este espesor inicial podrá variar en el futuro en función de la necesidad de almacenamiento térmico ( $\text{kJ/m}^2$ ) o de los ensayos de caracterización mecánica.

**Tabla 10.** Componentes para la preparación de las muestras del prototipo de panel arcilla-PCM para las tres arcillas estabilizadas (SR, SY, SB), incluyendo un panel de arcilla sin PCM (panel de referencia)

Muestra	Panel arcilla+ 0%PCM	Panel arcilla+ 10%PCM	Panel arcilla+ 15%PCM	Panel arcilla+ 20%PCM
Componente	Fracción de masa (% m/m)	Fracción de masa (% m/m)	Fracción de masa (% m/m)	Fracción de masa (% m/m)
Arcilla (SR, SY o SB)	76.75 %	66.75 %	61.75 %	56.75 %
Alginato	3.00 %	3.00 %	3.00 %	3.00 %
Fibra de lana de oveja	0.25 %	0.25 %	0.25 %	0.25 %
Micronal® 28D	-	10.00 %	15.00 %	20.00 %
Agua	20.00 %	20.00 %	20.00 %	20.00 %

Dadas las limitaciones de uso de los laboratorios ya comentadas para el trabajo experimental que incluyeran la preparación de muestras, se ha querido estudiar un proceso hipotético de manufacturación del prototipo de panel, basándose para ello en el método de composición directa para materiales porosos y materiales de cambio de fase; estableciendo: una primera fase de pre-mezcla en seco de los componentes, según las dosis referidas en la **Tabla 10**; una segunda fase de adición del agua para su disolución en la dosis correspondiente (ver **Tabla 10**) y de amasado de la pasta resultante mediante la mezcla mecánica de la solución para una distribución homogénea de los componentes; una tercera fase de traspaso de la pasta al molde; y una cuarta fase de secado. El proceso hipotético de manufacturación se ilustra en la **Fig. 45**.



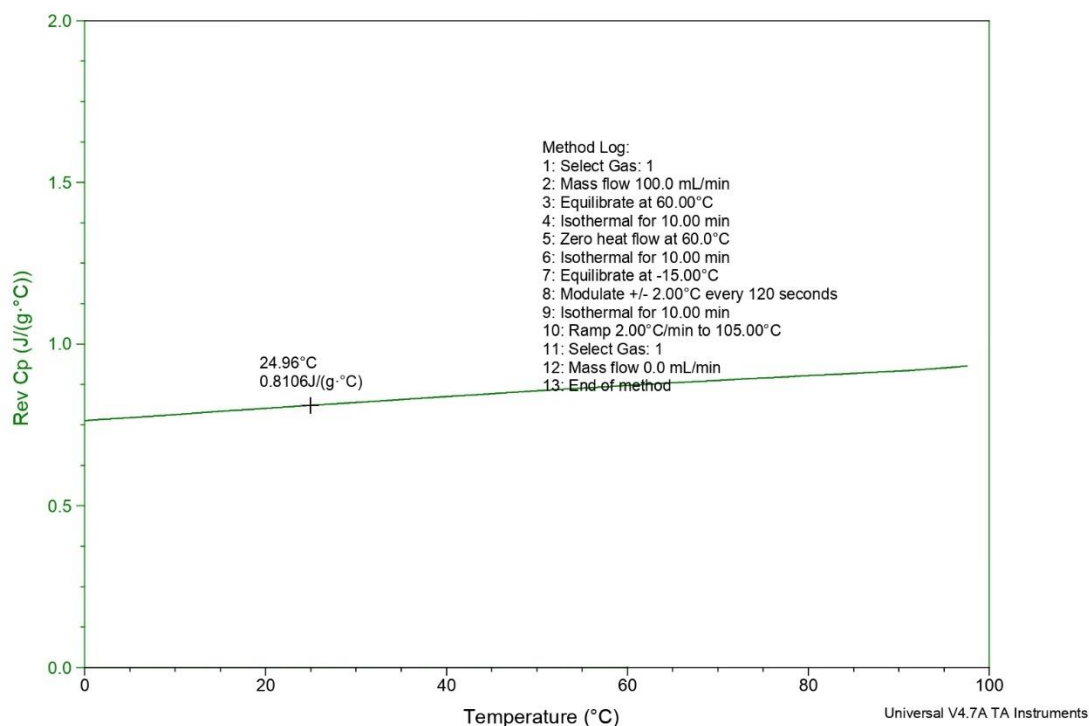
**Fig. 45.** Proceso hipotético de manufacturación de la solución de panel arcilla-PCM

## 5.2. Procesos de caracterización térmica por metodología experimental y cálculo numérico

### 5.2.1. Caracterización térmica de la arcilla por metodología experimental y cálculo numérico

Para completar la caracterización térmica de las arcillas seleccionadas, desarrollada en el subapartado 5.1.1 según [59], se procede a analizar la capacidad calorífica específica de cada una de ellas siguiendo una metodología experimental, mediante una serie de ensayos de calorimetría diferencial de barrido (DSC), llevados a cabo entre el Instituto de Ciencia de Materiales de Sevilla (ICMSE) y el servicio de caracterización funcional de los Servicios Generales de Investigación de la Universidad de Sevilla (CITIUS).

Para esta caracterización experimental, se preparan y analizan tres muestras para cada tipo de arcilla (SR, SY, SB), en base a la siguiente nomenclatura: SR-1, SR-2 y SR-3 para las tres muestras de arcilla roja (SR); SY-1, SY-2 y SY-3 para las tres muestras de arcilla amarilla (SY); y SB-1, SB-2 y SB-3 para las tres muestras de arcilla negra (SB). Se han empleado dos tipos de ensayo para la caracterización de la capacidad calorífica específica ( $c_p$ ): mediante rampa lineal (o DSC estándar) (ver **Fig. 46**) y mediante rampa modulada (MDSC) (ver **Fig. 47**). La medición de la  $c_p$  en estos ensayos sigue métodos diferentes, siendo de menor precisión en el primer caso, donde se mide la capacidad calorífica en un rango de temperatura, y de mayor precisión en el segundo, que mide la  $c_p$  para un valor de temperatura específico, detectando el proceso con una mayor sensibilidad y resolución. Los termogramas del ensayo por calorimetría diferencial de barrido realizado para cada muestra se recogen en las **Fig. 46-54**, incluidas en los **Anexos** al final de este documento; incluyendo en este subapartado sólo un ejemplo de cada tipo de ensayo. La **Tabla 11** recoge los resultados de dichos ensayos para la caracterización experimental de cada tipo de arcilla.



**Fig. 46.** Termograma por calorimetría diferencial de barrido mediante rampa modulada (MDSC) de la muestra SR-1 de la arcilla roja (SR)



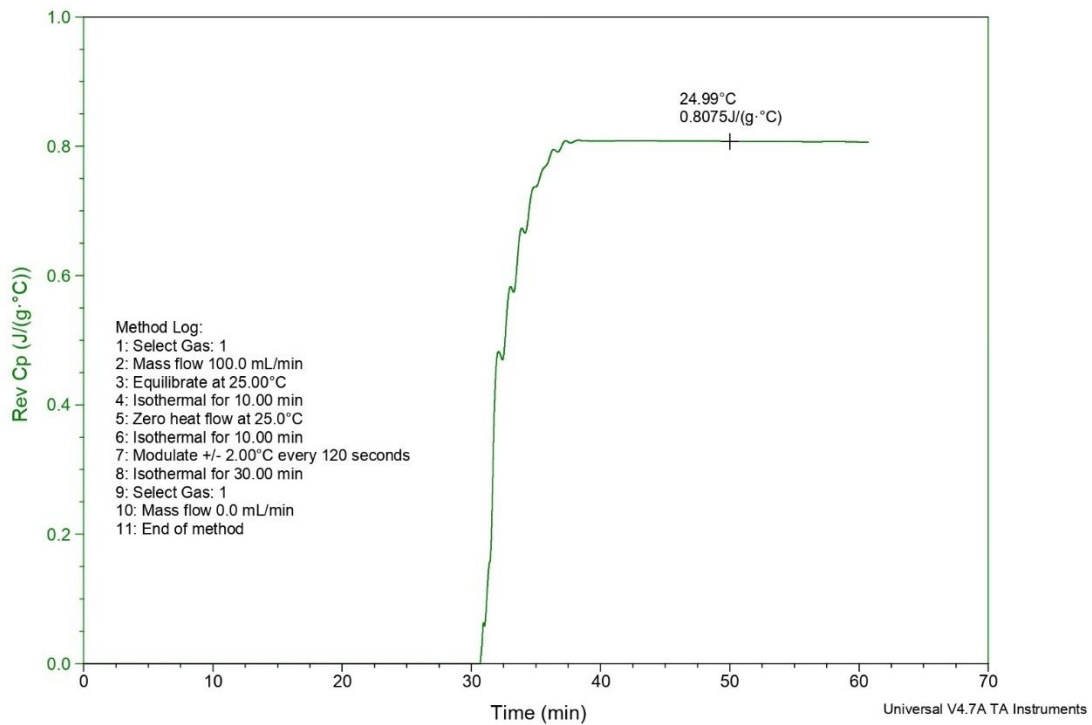


Fig. 47. Termograma por calorimetría diferencial de barrido mediante rampa lineal (DSC) de la muestra SR-2 de la arcilla roja (SR)

Tabla 11. Resultados para la caracterización experimental por calorimetría diferencial de barrido de cada una de las muestras de cada tipo de arcilla (SR, SY, SB)

Tipo de arcilla	Muestra	Masa (mg)	Capacidad calorífica específica (kJ/kg°C)
SR	SR-1	13.6	0.811
	SR-2	11.8	0.808
	SR-3	10.9	0.900
SY	SY-1	13.3	0.815
	SY-2	12.9	0.738
	SY-3	11.0	0.824
SB	SB-1	17.1	0.775
	SB-2	14.2	0.712
	SB-3	13.7	0.762

Una vez realizados los ensayos, para la caracterización térmica de cada tipo de arcilla, se determina la capacidad calorífica específica calculando la media de los valores medidos para las tres muestras de cada arcilla. La capacidad calorífica específica ( $c_p$ ) de las arcillas así caracterizadas se recoge en la **Tabla 12**, junto al resto de propiedades previamente medidas en [59] y vinculadas a la capacidad de almacenamiento térmico del material estabilizado.

**Tabla 12.** Resultados de la caracterización térmica experimental de las arcillas estabilizadas (SR, SY, SB)

Tipo de arcilla	Dosificación	Densidad ( $\rho$ )	Conductividad térmica ( $\lambda$ )	Capacidad calorífica específica ( $c_p$ )
	Alginato/Fibra/Agua (%)	kg/m <sup>3</sup>	W/m°C	kJ/kg°C
SR	3.00/0.25/20.00	1510	0.53	0.839
SY	3.00/0.25/20.00	1450	0.68	0.792
SB	3.00/0.25/20.00	1390	0.61	0.750

Los resultados de la caracterización térmica experimental de las arcillas para la determinación de la capacidad calorífica específica ( $c_p$ ) se emplean para determinar la capacidad de almacenamiento térmico o entalpía por unidad de masa ( $Q$  ó  $\Delta H$ ) de las mismas, siguiendo para ello la metodología de cálculo del *método simple*, detallado por Pomianowski et al. [73], y referido a la ecuación básica de la entalpía por unidad de masa **(2)** como función de la temperatura. Esta ecuación, relativa sólo al calor sensible, relaciona la cantidad de calor  $Q$  que intercambia un sistema con su entorno mientras experimenta una variación de temperatura  $\Delta T$ , desde la temperatura inicial  $T_i$  hasta la temperatura final  $T_f$ .

$$Q \text{ (kJ/kg)} = \int_{T_i}^{T_f} c_p(T) \quad \text{(2)}$$

En el caso de las arcillas, dado que la capacidad calorífica específica se presenta como un valor constante, la ecuación puede definirse como:

$$Q \text{ (kJ/kg)} \approx c_p \cdot \Delta T \quad \text{(3)}$$

La **Tabla 13** recoge la entalpía por unidad de masa (kJ/kg) de las arcillas, calculadas por el *método simple* según la ecuación **(3)**, para una diferencia de temperatura de 15°C (20°C-35°C). Asimismo, para poder incluir estos valores como un hipotético panel de arcilla sin PCM (panel de referencia) en el análisis comparativo del panel arcilla-PCM propuesto, desarrollado en el subapartado 5.3.1, se calcula igualmente la capacidad calorífica específica por unidad de superficie (kJ/m<sup>2</sup>) para cada arcilla, siguiendo para ello la ecuación **(4)**, que relaciona la capacidad calorífica específica por unidad de masa con la densidad del material ( $\rho$ ) y con el espesor del panel hipotético ( $e$ ), el cual se establece igual al del panel propuesto (0.02 m), para así poder realizar una comparación representativa de resultados.

$$Q_{panel} \text{ (kJ/km}^2\text{)} = Q \cdot \rho \cdot e \quad \text{(4)}$$

Estos resultados posicionan a la arcilla roja (SR) como el tipo de arcilla estabilizada con mejor capacidad de almacenamiento térmico. Por ello, se selecciona para análisis ulteriores relacionados con la distribución de la entalpía, por unidad de masa (kJ/kg) y de superficie (kJ/m<sup>2</sup>), en un rango de temperatura de 15°C, concretamente, en el intervalo de 20°C a 35°C. La **Tabla 14** recoge el cálculo numérico de la capacidad de almacenamiento térmico de la arcilla roja (SR), esto es, de la distribución de la entalpía por unidad de masa de la arcilla roja (SR), siguiendo la ecuación **(2)**. En esta ecuación, la integral de la capacidad calorífica específica ( $c_p$ ) para el cálculo de la entalpía por unidad de masa ( $Q$ )

equivale al cálculo del área limitada por la gráfica de  $c_p$  y el eje x. Por su parte, el cálculo de la entalpía por unidad de superficie ( $Q_{\text{panel}}$ ) se determina aplicando la ecuación (3) a la entalpía por unidad de masa en cada unidad de temperatura. La Fig. 55 representa los valores resultantes de los cálculos para la distribución de la entalpía por unidad de masa de la arcilla roja (SR), así como para la capacidad calorífica específica, como función del rango de temperatura definido.

**Tabla 13.** Resultados de la caracterización térmica teórica para la determinación de la capacidad de almacenamiento térmico de las arcillas (SR, SY, SB)

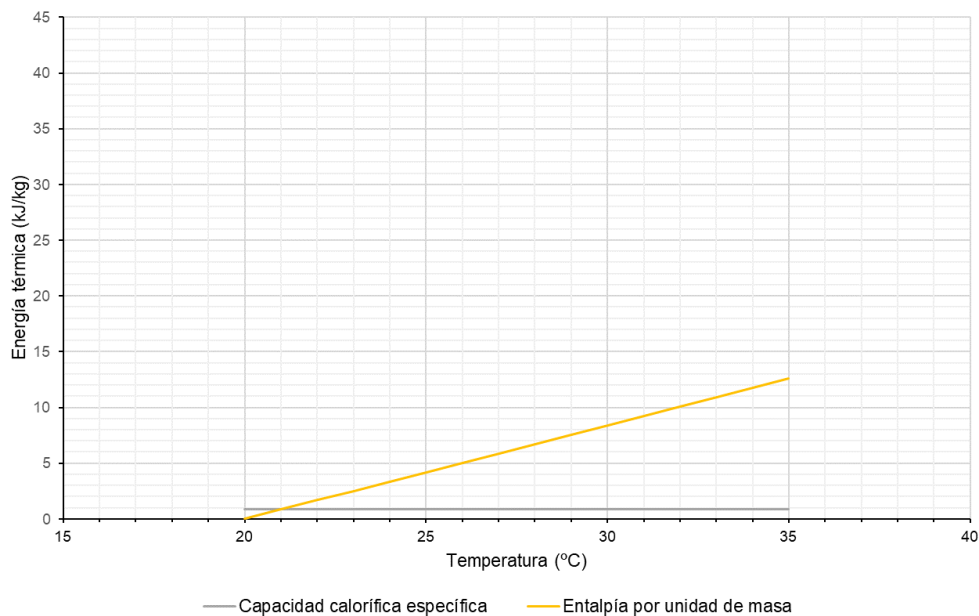
Tipo de arcilla	Densidad ( $\rho$ )	Capacidad calorífica específica ( $c_p$ )	Variación de temperatura ( $\Delta T$ )	Entalpía por unidad de masa (Q)	Entalpía por unidad de superficie* ( $Q_{\text{panel}}$ )
	kg/m <sup>3</sup>	kJ/kg°C	°C	kJ/kg	kJ/m <sup>2</sup>
<b>SR</b>	1510	0.839	15	12.59	380.07
<b>SY</b>	1450	0.792	15	11.88	344.52
<b>SB</b>	1390	0.750	15	11.25	312.75

\*Para un espesor de 0.02 m

## Arcilla roja (SR)

**Tabla 14.** Cálculo numérico de la distribución de la entalpía (por calor sensible) de la arcilla roja (SR), junto a la capacidad calorífica específica, en el intervalo de temperatura de 20°C a 35°C

Temperatura (T)	Capacidad calorífica específica ( $c_p$ )	Entalpía por unidad de masa (Q)	Entalpía por unidad de superficie ( $Q_{\text{panel}}$ )
°C	kJ/kg°C	kJ/kg	kJ/m <sup>2</sup>
20	0.839	0.00	0.00
21	0.839	0.84	25.34
22	0.839	1.68	50.68
23	0.839	2.52	76.01
24	0.839	3.36	101.35
25	0.839	4.20	126.69
26	0.839	5.03	152.03
27	0.839	5.87	177.37
28	0.839	6.71	202.70
29	0.839	7.55	228.04
30	0.839	8.39	253.38
31	0.839	9.23	278.72
32	0.839	10.07	304.05
33	0.839	10.91	329.39
34	0.839	11.75	354.73
35	0.839	<b>12.59</b>	<b>380.07</b>

**Fig. 55.** Distribución de la entalpía por unidad de masa de la arcilla roja (SR), junto a la capacidad calorífica específica, en el intervalo de temperatura de 20°C a 35°C

### 5.2.2. Caracterización térmica del PCM microencapsulado por cálculo numérico

Para la caracterización térmica del PCM microencapsulado seleccionado, a partir de la información proporcionada por Microtek Laboratories, Inc. en la documentación técnica de sus productos [64,65,67], se dispone de los valores determinados para la temperatura de fusión ( $T_{\text{fusión}}$ ), la capacidad calorífica específica ( $c_p$ ) y la entalpía de fusión por unidad de masa ( $Q_{\text{latente}}$  ó  $\Delta H_{\text{latente}}$ ) del Micronal® 28D.

Dado que la entalpía de fusión por unidad de masa sólo corresponde a la energía térmica necesaria para el cambio de fase de sólido a líquido, es decir, a la capacidad de almacenamiento de calor latente del material, este valor no representa la capacidad de almacenamiento térmico total, por lo que será necesario completar la caracterización térmica, siguiendo para ello metodologías de cálculo numérico a partir de la documentación disponible.

Se emplea la capacidad calorífica específica ( $c_p$ ) del PCM para determinar la capacidad de almacenamiento térmico sensible ( $Q_{\text{sensible}}$  ó  $\Delta H_{\text{sensible}}$ ) del material, siguiendo para ello nuevamente la metodología de cálculo del *método simple*, detallado por Pomianowski et al. [73], y referido a la ecuación básica de la entalpía por unidad de masa **(2)** como función de la temperatura.

$$Q \text{ (kJ/kg)} = \int_{T_i}^{T_f} c_p(T) \quad \text{(2)}$$

La capacidad calorífica específica, relativa al calor sensible, del PCM se presenta como un valor constante, de modo que la ecuación puede definirse como:

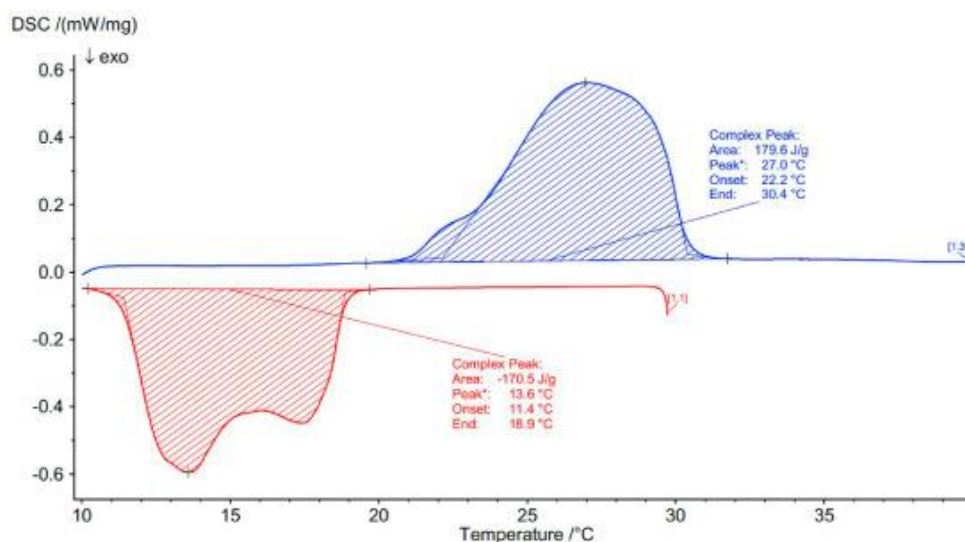
$$Q \text{ (kJ/kg)} \approx c_p \cdot \Delta T \quad \text{(3)}$$

La capacidad de almacenamiento térmico total o entalpía por unidad de masa ( $Q$  ó  $\Delta H$ ) del PCM microencapsulado, para una diferencia de temperatura de 15°C (20°C-35°C), resulta de la suma de su capacidad de almacenamiento térmico sensible, calculada por el *método simple* según la ecuación **(3)**, y de su capacidad de almacenamiento térmico latente, determinada por el proveedor en la documentación técnica [64,65,67] (ver ecuación **(5)**). La **Tabla 15** recoge la entalpía por unidad de masa (kJ/kg) del PCM microencapsulado. Se prescinde de los cálculos para la entalpía por unidad de superficie (kJ/m<sup>2</sup>) para su incorporación en el análisis comparativo dada la inviabilidad de un hipotético panel de PCM compuesto en su totalidad por este material de cambio de fase.

$$Q \text{ (kJ/kg)} = Q_{\text{sensible}} + Q_{\text{latente}} \quad \text{(5)}$$

Para el análisis de la distribución conjunta de la entalpía por unidad de masa (kJ/kg) del PCM microencapsulado, se precisa realizar una estimación de la distribución de la capacidad calorífica aparente del material durante el cambio de fase. Para ello, a partir de la ecuación **(2)**, se sigue un proceso inverso en el cálculo numérico de la entalpía ( $Q$ ) como función integral de la capacidad calorífica aparente ( $c_{pa}$ ) del modo que sigue. El valor de la entalpía de fusión ( $Q_{\text{latente}}$ ) del PCM microencapsulado corresponde al área integrada entre la curva de la capacidad calorífica aparente ( $c_{pa}$ ) durante el proceso de cambio de fase y la

*base line* trazada entre la temperatura de inicio y de fin de dicho proceso [74] (ver **Fig. 56**). Por tanto, a partir del valor resultante de esta área, se puede hacer una estimación de los valores de dicha curva ( $c_p$ ) para las unidades de temperatura implicadas en el cambio de fase, dividiendo el total del área entre este rango de temperaturas.



**Fig. 56.** Termograma del ensayo por calorimetría diferencial de barrido (DSC) de un material de cambio de fase, donde se representa la *baseline* entre las temperaturas de inicio y de fin del proceso de cambio de fase, así como el área sombreada (azul), que esta *baseline* encierra, como valor de la entalpía de fusión durante dicho proceso. Fuente: [75]

El cálculo estimado de la capacidad calorífica aparente del PCM microencapsulado para cada unidad de temperatura, junto al correspondiente grado de conversión del material, durante el proceso de fusión ( $28^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ) se recoge en la **Tabla 16**. La **Tabla 16** también recoge el cálculo numérico de la capacidad de almacenamiento térmico total del PCM microencapsulado Micronal® 28D, esto es, el cálculo de la distribución de la entalpía por unidad de masa ( $Q$ ), siguiendo la ecuación (1), en el mismo intervalo de temperatura definido en el subapartado anterior para la arcilla roja ( $20^{\circ}\text{C}$ - $35^{\circ}\text{C}$ ). La **Fig. 57** representa los valores resultantes de este cálculo para la distribución de la entalpía del PCM microencapsulado, así como para la capacidad calorífica aparente, en función del rango de temperatura definido.

**PCM microencapsulado Micronal® 28D**

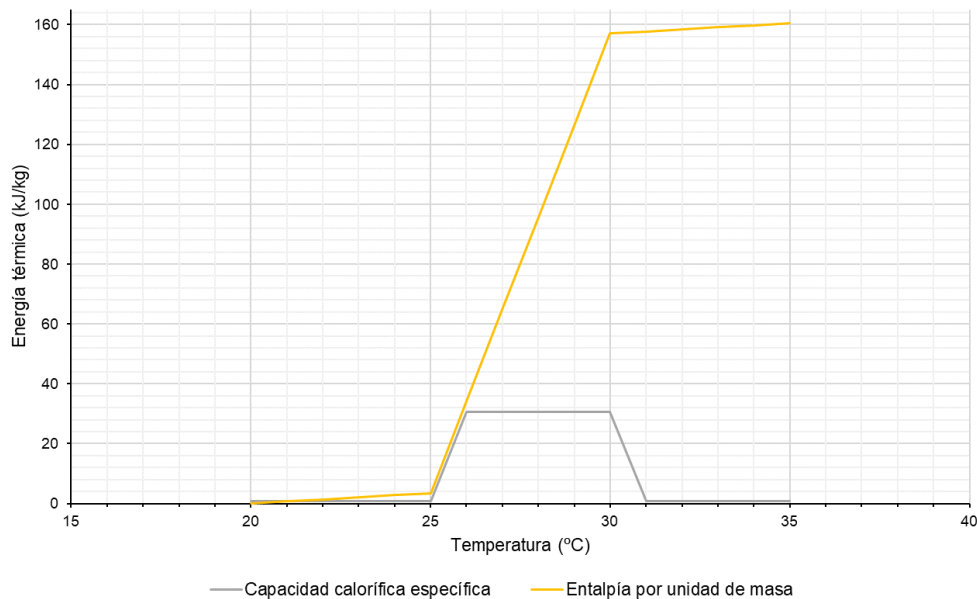
**Tabla 15.** Resultados de la caracterización térmica teórica para la determinación de la capacidad de almacenamiento térmico del PCM microencapsulado Micronal® 28D

PCM	Densidad ( $\rho$ )	Temp. fusión ( $T_f$ )	Capacidad calorífica específica ( $c_p$ )	Variación de temp. ( $\Delta T$ )	Entalpía de fusión ( $Q_{latente}$ )	Entalpía por unidad de masa ( $Q$ )
	kg/m <sup>3</sup>	°C	kJ/kg°C	°C	kJ/kg	kJ/kg
<b>Micronal® 28D</b>	300	28 ( $\pm 2^\circ\text{C}$ )	0.700*	15	150.00	160.50

\*Valor estimado a falta de datos

**Tabla 16.** Cálculo numérico de la distribución de la entalpía del PCM microencapsulado Micronal® 28D, junto a la capacidad calorífica aparente (sensible y latente), en el intervalo de temperatura de 20°C a 35°C

Temperatura (T) °C	Grado de conversión %	Capacidad calorífica aparente ( $c_{pa}$ )			Entalpía por unidad de masa (Q) kJ/kg
		Sensible kJ/kg°C	Latente kJ/kg°C	Total kJ/kg°C	
20	0.00	0.700		0.700	0.00
21	0.00	0.700		0.700	0.70
22	0.00	0.700		0.700	1.40
23	0.00	0.700		0.700	2.10
24	0.00	0.700		0.700	2.80
25	0.00	0.700		0.700	3.50
26	20.00	0.700	30.000	30.700	34.20
27	40.00	0.700	30.000	30.700	64.90
<b>28</b>	60.00	0.700	30.000	30.700	95.60
29	80.00	0.700	30.000	30.700	126.30
30	100.00	0.700	30.000	30.700	157.00
31	100.00	0.700		0.700	157.70
32	100.00	0.700		0.700	158.40
33	100.00	0.700		0.700	159.10
34	100.00	0.700		0.700	159.80
35	100.00	0.700		0.700	<b>160.50</b>



**Fig. 57.** Distribución de la entalpía del PCM microencapsulado Micronal® 28D, junto a la capacidad calorífica aparente (sensible y latente), en el intervalo de temperatura de 20°C a 35°C

## 5.2.3. Caracterización térmica del panel arcilla-PCM por cálculo numérico

Para la caracterización térmica del panel arcilla-PCM propuesto, dadas las limitaciones coyunturales previamente justificadas para la realización de ensayos experimentales durante el desarrollo del presente trabajo, se desarrollan cálculos numéricos en base a la literatura revisada para su determinación a partir de las propiedades de los componentes agregados [22,76–79].

La **Tabla 17** resume los resultados de la caracterización térmica de la arcilla roja estabilizada (SR), seleccionada por presentar una mejor capacidad de almacenamiento térmico sensible según se refiere en el subapartado 5.2.1, y del PCM microencapsulado Micronal® 28D.

**Tabla 17.** Resumen de resultados de la caracterización térmica de la arcilla roja estabilizada (SR) y el PCM microencapsulado Micronal® 28D

Componente	Densidad ( $\rho$ )	Capacidad calorífica específica ( $c_p$ )	Variación de temperatura ( $\Delta T$ )	Entalpía por unidad de masa ( $Q$ )
	kg/m <sup>3</sup>	kJ/kg°C	°C	kJ/kg
Arcilla roja estabilizada (SR)	1510	0.839	15	12.59
Micronal® 28D	300	0.700*	15	160.50

\*Valor estimado a falta de datos

Por un lado, para la determinación de la densidad del panel arcilla-PCM, en base a la ecuación (6), se define la densidad del panel ( $\rho_{\text{panel}}$ ) como la masa total ( $m_{\text{panel}}$ ) del panel por unidad de volumen total. Para ello, se determina el volumen total del panel ( $V_{\text{panel}}$ ) como la suma de la fracción de volumen de la arcilla estabilizada y la fracción de volumen del PCM microencapsulado. La fracción de volumen de cada componente ( $V_{\text{arcilla}}$  y  $V_{\text{PCM}}$ ) se calcula a partir de la ecuación (6), conociendo la densidad de cada componente (ver **Tabla 17**) y considerando como valor de masa ( $m_{\text{arcilla}}$  y  $m_{\text{PCM}}$ ) la fracción de masa (% m/m) del componente en el panel (ver **Tabla 18-20**).

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (6)$$

Por otro lado, la capacidad de almacenamiento térmico o entalpía por unidad de masa ( $Q$  ó  $\Delta H$ ) del panel arcilla-PCM se calcula siguiendo el método teórico de la fracción de masa, desarrollado por Pomianowski et al. [73] para la caracterización térmica de materiales compuestos con PCM microencapsulado integrado, según la ecuación (7). Por su parte, la entalpía por unidad de superficie (kJ/m<sup>2</sup>) del panel arcilla-PCM se determina en base a la densidad calculada para cada muestra de panel y al espesor establecido para el prototipo (20mm). Las **Tabla 18-20** recogen la capacidad de almacenamiento térmico o entalpía, para una diferencia de temperatura de 15°C (20°C-35°C), de cada muestra del panel arcilla-PCM, definida en el subapartado 5.1.3, a excepción del panel arcilla+0%PCM, que ya fue caracterizado en el subapartado 5.2.1 al caracterizar las arcillas estabilizadas.



$$Q_{\text{arcilla-PCM}} = Q_{\text{arcilla}} \cdot \%_{\text{arcilla}} + Q_{\text{PCM}} \cdot \%_{\text{PCM}} \quad (7)$$

donde  $Q_{\text{arcilla-PCM}}$  es la entalpía por unidad de masa del panel arcilla-PCM,  $Q_{\text{arcilla}}$  es la entalpía por unidad de masa de la arcilla estabilizada,  $\%_{\text{arcilla}}$  es la fracción de masa de la arcilla estabilizada en el panel,  $Q_{\text{PCM}}$  es la entalpía por unidad de masa del PCM microencapsulado y  $\%_{\text{PCM}}$  es la fracción de masa del PCM microencapsulado en el panel

Finalmente, para el análisis de la distribución conjunta de la entalpía del panel arcilla-PCM, se precisa calcular la capacidad calorífica aparente ( $c_{\text{pa}}$ ) por calor sensible y latente de dicho panel para cada unidad de temperatura. Para ello, siguiendo el método teórico de la fracción de masa, desarrollado por Pomianowski et al. [73], la capacidad calorífica aparente del panel arcilla-PCM se determina como la suma de la capacidad calorífica en cada unidad de temperatura de la fracción de masa de la arcilla estabilizada y de la fracción de masa del PCM microencapsulado (ver ecuación (8)) [22] [79].

$$C_{p_{\text{arcilla-PCM}}} = C_{p_{\text{arcilla}}} \cdot \%_{\text{arcilla}} + C_{p_{\text{PCM}}} \cdot \%_{\text{PCM}} \quad (8)$$

donde  $C_{p_{\text{arcilla-PCM}}}$  es la capacidad calorífica aparente del panel arcilla-PCM,  $C_{p_{\text{arcilla}}}$  es la capacidad calorífica específica de la arcilla estabilizada,  $\%_{\text{arcilla}}$  es la fracción de masa de la arcilla estabilizada en el panel,  $C_{p_{\text{PCM}}}$  es la capacidad calorífica aparente del PCM microencapsulado y  $\%_{\text{PCM}}$  es la fracción de masa del PCM microencapsulado en el panel

Las **Tabla 21-23** recogen el cálculo numérico de la capacidad de almacenamiento térmico total del panel arcilla-PCM para cada muestra, esto es, el cálculo de la distribución de la entalpía por unidad de masa (kJ/kg) y de superficie (kJ/m<sup>2</sup>), siguiendo la ecuación (2), en el mismo intervalo de temperatura definido en los subapartados anteriores (20°C-35°C). Las **Fig. 58-60** representan los valores resultantes de este cálculo para la distribución de la entalpía de cada muestra del panel arcilla-PCM, así como para la capacidad calorífica aparente, como función del rango de temperatura definido.

## Panel arcilla+10%PCM

Tabla 18. Caracterización termo-física del panel arcilla+10%Mpcm

	Masa (m)	Fracción de masa (% m/m)	Volumen (V)	Densidad ( $\rho$ )	Capacidad calorífica aparente ( $C_{pa}$ )	Entalpía por unidad de masa (Q)	Entalpía por unidad de superficie ( $Q_{panel}$ )
	kg	%	m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kJ/kg°C	kJ/kg	kJ/m <sup>2</sup>
Arcilla (SR) estabilizada	3.6	90.00	0.00238	1510	0.839	12.59	-
Micronal® 28D	0.4	10.00	0.00133	300	ver Tabla 11	160.50	-
Panel arcilla+10%PCM	4.0	100.00	0.00372	1076.01	ver Tabla 18	27.38	589.15

Tabla 21. Cálculo numérico de la distribución de la entalpía del panel arcilla+10%PCM, junto a la capacidad calorífica aparente, en el intervalo de temperatura de 20°C a 35°C

Temperatura (T)	Capacidad calorífica aparente ( $C_{pa}$ )	Entalpía por unidad de masa (Q)	Entalpía por unidad de superficie ( $Q_{panel}$ )
°C	kJ/kg°C	kJ/kg	kJ/m <sup>2</sup>
20	0.825	0.00	0.00
21	0.825	0.83	17.76
22	0.825	1.65	35.51
23	0.825	2.48	53.27
24	0.825	3.30	71.03
25	0.825	4.13	88.78
26	3.825	7.95	171.10
27	3.825	11.78	253.42
28	3.825	15.60	335.73
29	3.825	19.43	418.05
30	3.825	23.25	500.37
31	0.825	24.08	518.12
32	0.825	24.90	535.88
33	0.825	25.73	553.63
34	0.825	26.55	571.39
35	0.825	<b>27.38</b>	<b>589.15</b>

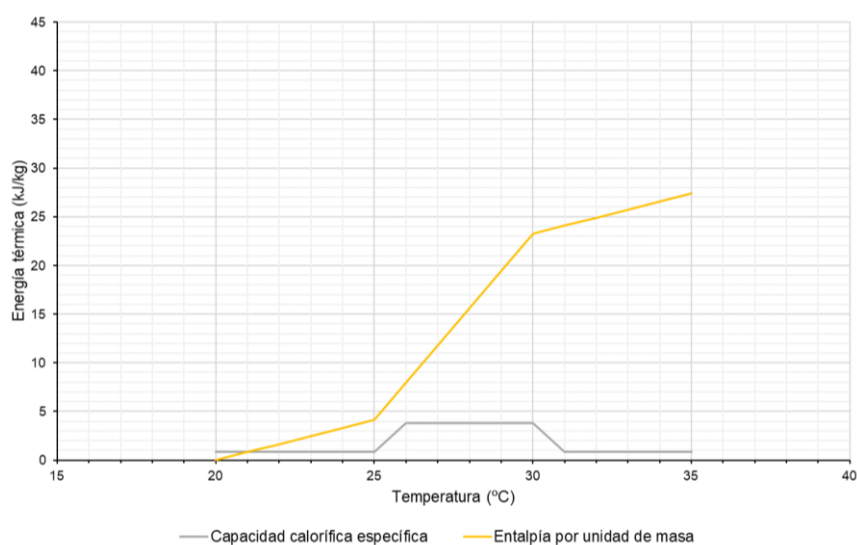


Fig. 58. Distribución de la entalpía por unidad de masa del panel arcilla+10%PCM, junto a la capacidad calorífica aparente, en el intervalo de temperatura de 20°C a 35°C

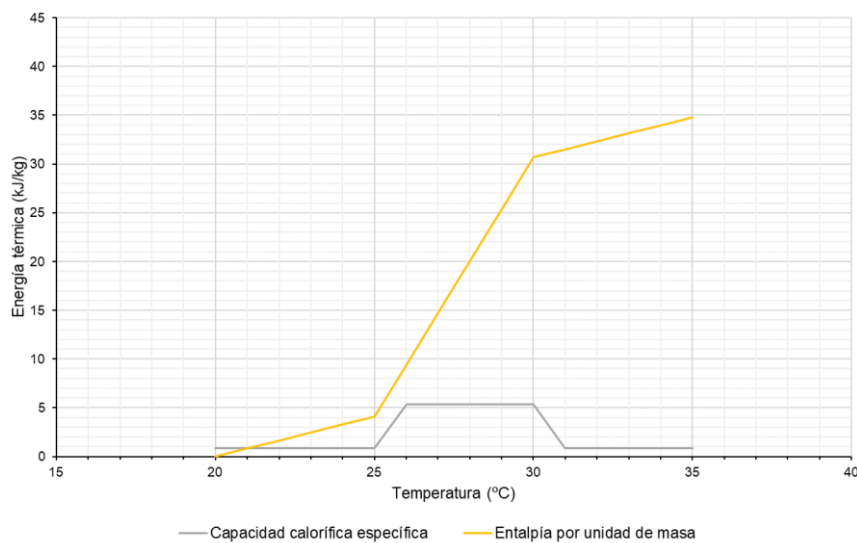
**Panel arcilla+15%PCM**

**Tabla 19.** Caracterización termo-física del panel arcilla+15%PCM

	Masa (m)	Fracción de masa (% m/m)	Volumen (V)	Densidad (ρ)	Capacidad calorífica aparente (C <sub>pa</sub> )	Entalpía por unidad de masa (Q)	Entalpía por unidad de superficie (Q <sub>panel</sub> )
	kg	%	m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kJ/kg°C	kJ/kg	kJ/m <sup>2</sup>
<b>Arcilla (SR) estabilizada</b>	3.4	85.00	0.00225	1510	0.839	12.59	-
<b>Micronal® 28D</b>	0.6	15.00	0.00200	300	ver <b>Tabla 11</b>	160.50	-
<b>Panel arcilla+15%PCM</b>	4.0	100.00	0.00425	940.81	ver <b>Tabla 19</b>	34.77	654.28

**Tabla 22.** Cálculo numérico de la distribución de la entalpía del panel arcilla+15%PCM, junto a la capacidad calorífica aparente, en el intervalo de temperatura de 20°C a 35°C

Temperatura (T)	Capacidad calorífica aparente (C <sub>pa</sub> )	Entalpía por unidad de masa (Q)	Entalpía por unidad de superficie (Q <sub>panel</sub> )
°C	kJ/kg°C	kJ/kg	kJ/m <sup>2</sup>
20	0.818	0.00	0.00
21	0.818	0.82	15.39
22	0.818	1.64	30.79
23	0.818	2.45	46.18
24	0.818	3.27	61.58
25	0.818	4.09	76.97
26	5.818	9.41	177.04
27	5.818	14.73	277.11
28	5.818	20.05	377.17
29	5.818	25.36	477.24
30	5.818	30.68	577.31
31	0.818	31.50	592.70
32	0.818	32.32	608.10
33	0.818	33.14	623.49
34	0.818	33.95	638.89
35	0.818	<b>34.77</b>	<b>654.28</b>



**Fig. 59.** Distribución de la entalpía por unidad de masa del panel arcilla+15%PCM, junto a la capacidad calorífica aparente, en el intervalo de temperatura de 20°C a 35°C

## Panel arcilla+20%PCM

Tabla 20. Caracterización termo-física del panel arcilla+20%PCM

	Masa (m)	Fracción de masa (% m/m)	Volumen (V)	Densidad ( $\rho$ )	Capacidad calorífica aparente ( $C_{pa}$ )	Entalpía por unidad de masa (Q)	Entalpía por unidad de superficie ( $Q_{panel}$ )
	kg	%	m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kJ/kg°C	kJ/kg	kJ/m <sup>2</sup>
Arcilla (SR) estabilizada	3.2	80.00	0.00212	1510	0.839	12.59	-
Micronal® 28D	0.8	20.00	0.00267	300	ver Tabla 11	160.50	-
Panel arcilla+20%PCM	4.0	100.00	0.00479	835.79	ver Tabla 20	42.17	704.87

Tabla 23. Cálculo numérico de la distribución de la entalpía del panel arcilla+20%PCM, junto a la capacidad calorífica aparente, en el intervalo de temperatura de 20°C a 35°C

Temperatura (T)	Capacidad calorífica aparente ( $C_{pa}$ )	Entalpía por unidad de masa (Q)	Entalpía por unidad de superficie ( $Q_{panel}$ )
°C	kJ/kg°C	kJ/kg	kJ/m <sup>2</sup>
20	0.811	0.00	0.00
21	0.811	0.81	13.56
22	0.811	1.62	27.12
23	0.811	2.43	40.68
24	0.811	3.24	54.24
25	0.811	4.06	67.80
26	6.811	10.87	181.65
27	6.811	17.68	295.51
28	6.811	24.49	409.36
29	6.811	31.30	523.22
30	6.811	38.11	637.08
31	0.811	38.92	650.64
32	0.811	39.73	664.20
33	0.811	40.55	677.75
34	0.811	41.36	691.31
35	0.811	<b>42.17</b>	<b>704.87</b>

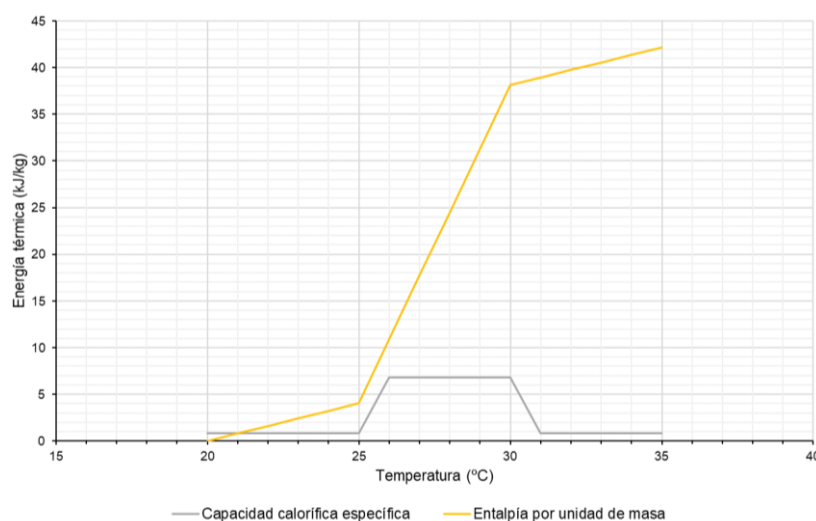


Fig. 60. Distribución de la entalpía por unidad de masa del panel arcilla+20%PCM, junto a la capacidad calorífica aparente, en el intervalo de temperatura de 20°C a 35°C

### 5.3. Comparación de prestaciones térmicas y discusión

#### 5.3.1. Comparación de las muestras del prototipo de panel arcilla-PCM

Los resultados de la caracterización térmica teórica del panel arcilla-PCM muestran que la incorporación de PCM microencapsulado en la propuesta aumenta la capacidad de almacenamiento térmico de la solución constructiva basada en arcilla, mejorando la distribución de la entalpía en función de la temperatura como resultado de la capacidad calorífica latente que aporta el material de cambio de fase. La **Fig. 61** resume la capacidad de almacenamiento térmico (para una diferencia de temperatura de 15°C) del prototipo de panel arcilla-PCM de 20mm de espesor para cada muestra, en base a la concentración de PCM microencapsulado. Así, la entalpía por unidad de masa (kJ/kg) del panel de arcilla+0%PCM (panel de referencia sin PCM) mejora en más de un 215% con la adición de un 10% de PCM, en un 275% con la adición de un 15% de PCM y en un 335% con la adición de un 20% de PCM (ver **Tabla 24**). Es decir, la incorporación del PCM microencapsulado en fracciones de masa inferiores al 25% del panel podría llegar a triplicar la capacidad de almacenamiento térmico de la solución constructiva mejorada.

Por su parte, la entalpía por unidad de superficie (kJ/m<sup>2</sup>) aumenta con mayor moderación al añadir PCM microencapsulado al panel (ver **Fig. 62**). Esto se explica al observar que la densidad del panel se reduce con el aumento de la concentración del PCM microencapsulado (ver **Tabla 24**), el cual se caracteriza por una densidad cinco veces inferior a la de la arcilla. En cualquier caso, la entalpía por unidad de superficie (kg/m<sup>2</sup>) del panel de arcilla+0%PCM de 0.02 m de espesor se ve mejorada en un 185% con la adición de un 20% de PCM (ver **Tabla 24**).

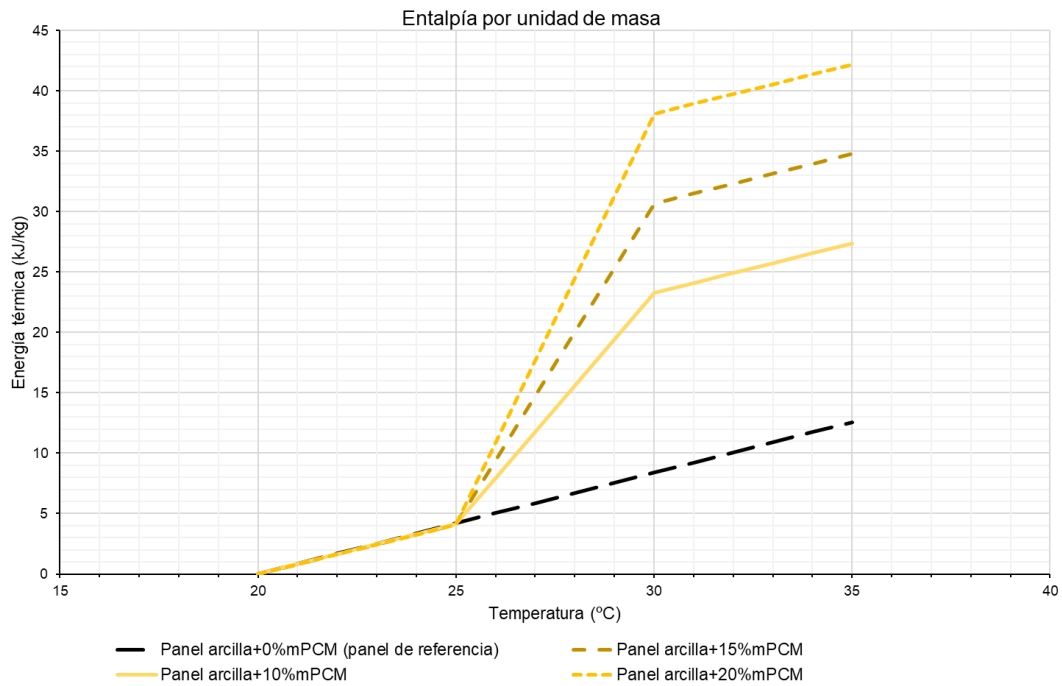
Por todo ello, se destaca el panel arcilla+20%PCM como la muestra del prototipo con mejores resultados sobre la capacidad de almacenamiento térmico de la solución constructiva, y se selecciona para el desarrollo y consecución de objetivos en los capítulos siguientes, así como en la comparación del prototipo con otras soluciones constructivas en el subapartado 5.3.2 que sigue.

**Tabla 24.** Tabla comparativa de la capacidad de almacenamiento térmico de las muestras del prototipo de panel arcilla-PCM, incluyendo el panel de arcilla sin PCM (panel de referencia), para una diferencia de temperatura de 15°C (20°C-35°C)

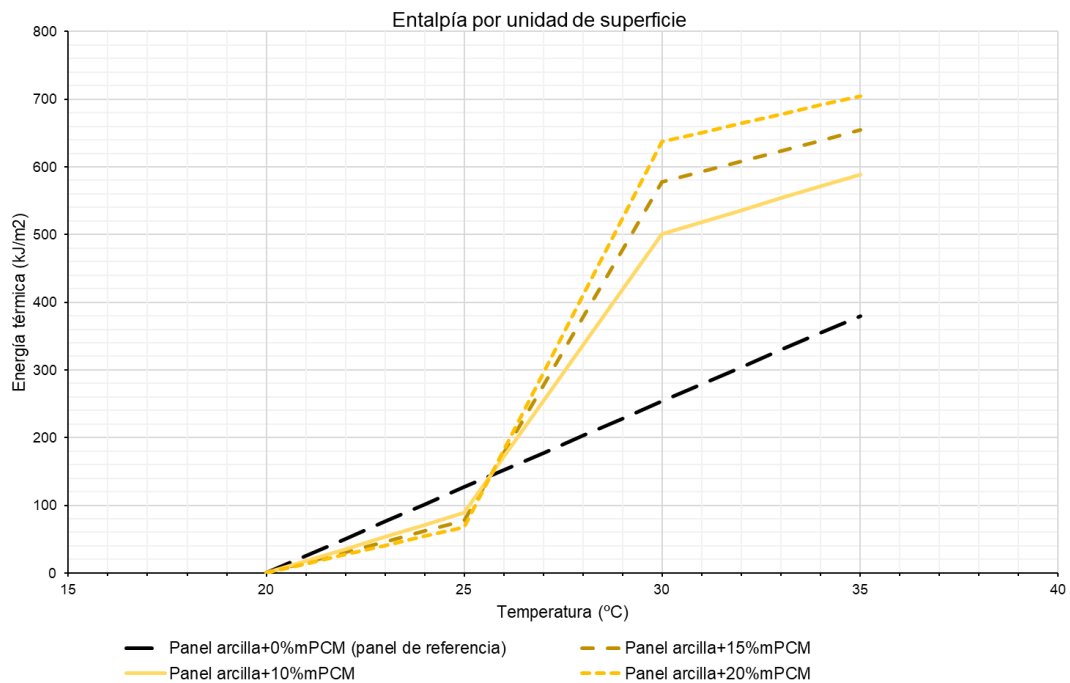
Muestra	Densidad ( $\rho$ )	Entalpía por unidad de masa (Q)	Entalpía por unidad de superficie (Q <sub>panel</sub> )**
	kg/m <sup>3</sup>	kJ/kg	kJ/m <sup>2</sup>
<b>Panel arcilla+0%PCM</b>	1510.00	12.59	380.07
<b>Panel arcilla+10%PCM</b>	1076.01	27.38 (↑215%*)	589.15 (↑155%*)
<b>Panel arcilla+15%PCM</b>	940.81	34.77 (↑275%*)	654.28 (↑172%*)
<b>Panel arcilla+20%PCM</b>	835.79	42.17 (↑335%*)	704.87 (↑185%*)

\*Respecto al panel arcilla+0%PCM (panel de referencia)

\*\*Para un espesor de panel de 0.02 m



**Fig. 61.** Distribución de la entalpía por unidad de masa (kJ/kg) de las muestras del prototipo de panel arcilla-PCM, incluyendo el panel de arcilla sin PCM (panel de referencia), para una diferencia de temperatura de 15°C (20°C-35°C)



**Fig. 62.** Distribución de la entalpía por unidad de superficie (kJ/m<sup>2</sup>) de las muestras del prototipo de panel arcilla-PCM, incluyendo el panel de arcilla sin PCM (panel de referencia), para una diferencia de temperatura de 15°C (20°C-35°C)

### 5.3.2. Comparación del prototipo de panel arcilla-PCM con otras soluciones

La comparación del prototipo de panel arcilla-PCM con otras soluciones constructivas sigue una revisión sistemática, por un lado, de aquella literatura publicada en la que se diseñen y estudien soluciones innovadoras basadas en PCM microencapsulado, bajo algún parámetro comparable con la solución de panel arcilla-PCM, y, por otro, de documentación técnica proporcionada por fabricantes de soluciones basadas en PCM microencapsulado actualmente comercializadas. Adicionalmente, se compara el panel arcilla-PCM con una serie de soluciones constructivas convencionales caracterizadas a partir de los ensayos realizados en [80]. Si bien estas soluciones convencionales corresponden a un tipo de aplicación (muro) distinto al propuesto para el panel arcilla-PCM (techo), el análisis comparativo entre ambas se encuentra igualmente pertinente al haber sido caracterizados térmicamente dentro de un mismo rango de temperaturas.

La revisión que sigue no sólo persigue hacer una aproximación crítica a la competitividad del prototipo desarrollado dentro de su respectivo campo de investigación y fabricación, sino también, desde un punto de vista más amplio, intentar detectar en los resultados aportados por otros equipos investigadores potenciales de mejora y parámetros clave para optimizar el diseño, implementación y comportamiento de la solución.

#### 5.3.2.1. Método de extracción de datos

El método de extracción de datos desarrollado se basa en los criterios de evaluación para sistemas de almacenamiento de energía térmica presentados en [81,82]. Cabe señalar la inherente dificultad que presenta una evaluación de este tipo dada la particularidad de condiciones y contextos en base a los cuales se desarrollan y justifican estos sistemas. No obstante, [81] matiza que se pueden reconocer ciertos criterios técnicos clave para alcanzar una configuración deseable dentro de dicha particularidad. Con esta base, se elabora una lista de parámetros a extraer de la literatura y la documentación técnica revisada. Estos datos se organizan en grupos de parámetros y se recogen en la **Tabla 25**.

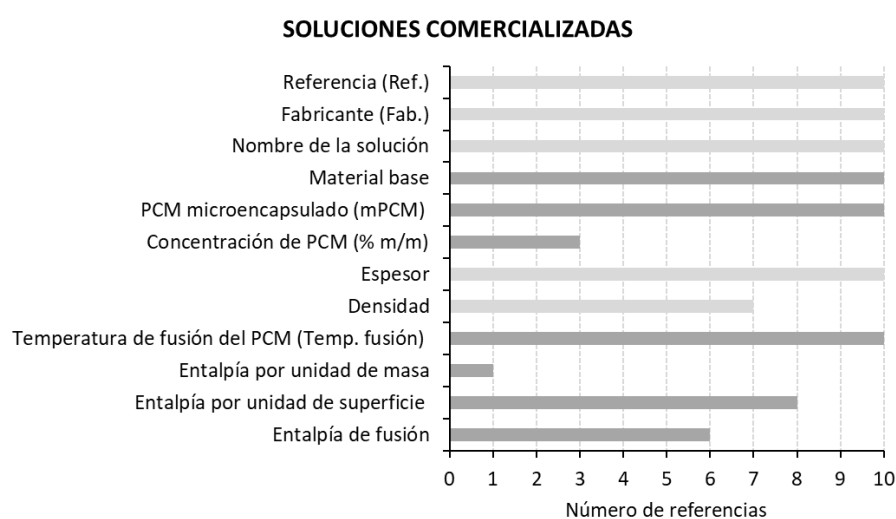
**Tabla 25.** Lista de parámetros agrupados a extraer para la revisión de las referencias

Grupo	Parámetros
Denominación	Referencia (Ref.) – Fabricante (Fab.) – Nombre de la solución
Composición	Material base – PCM microencapsulado (mPCM) en fracción de masa (% m/m)
Propiedades físicas	Espesor – Densidad
Propiedades térmicas	Temperatura de fusión del PCM (Temp. fusión) – Entalpía por unidad de masa – Entalpía por unidad de superficie – Entalpía de fusión

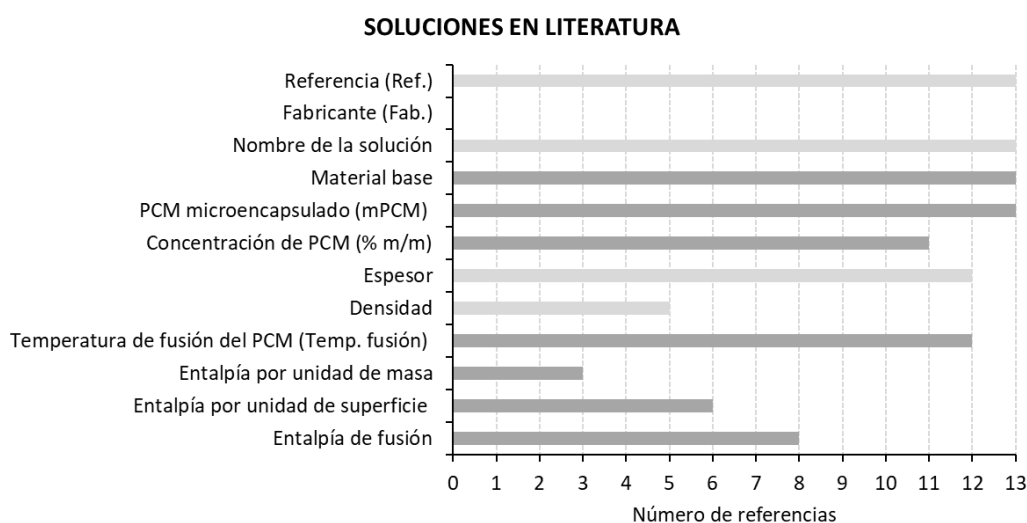
Durante el proceso de extracción de datos, aproximadamente 2/3 del número total de artículos recopilados para la revisión tuvo que ser descartado por la elevada falta de información en relación a los parámetros detallados en la **Tabla 25**, siendo el número de artículos que aportan casi la totalidad de parámetros muy reducido, tanto en las soluciones revisadas en literatura como en las soluciones comercializadas. La información proporcionada por los fabricantes para las soluciones comercializadas ha tenido que ser

completada en todo caso con los parámetros recogidos en manuales y obras de mayor extensión, donde estas soluciones se mencionan y describen, tal y como se detalla en las referencias de la **Tabla 26**.

Las **Fig. 63** y **Fig. 64** representan la disponibilidad de datos en las referencias revisadas, distinguiendo entre las soluciones comercializadas y las soluciones presentadas en literatura, respectivamente. Las observaciones que siguen se refieren en todo caso a los artículos que han sido recogidos en las **Tabla 26-27**, excluyendo aquellos artículos previamente descartados por falta de información. Asimismo, se excluyen las soluciones convencionales recogidas en la **Tabla 28**, por precisar de un análisis comparativo más específico al no constituir soluciones con PCM incorporado. Dicho análisis se desarrolla en el subapartado 5.3.2.3.



**Fig. 63.** Disponibilidad de datos para cada parámetro en las referencias de las soluciones comercializadas



**Fig. 64.** Disponibilidad de datos para cada parámetro en las referencias de las soluciones presentadas en literatura



Las **Tabla 26** y **Tabla 27** del subapartado 5.3.2.2 recogen las propiedades termo-físicas del prototipo de panel arcilla-PCM, junto a los parámetros extraídos para las soluciones comercializadas y las soluciones presentadas en literatura, respectivamente, que se han seleccionado para esta revisión. La **Tabla 28** del subapartado 5.3.2.3 recoge las propiedades termo-físicas del prototipo de panel arcilla-PCM, junto a los parámetros extraídos para una serie de soluciones constructivas convencionales sin PCM incorporado.

**Tabla 26.** Tabla comparativa de las propiedades termo-físicas del prototipo de panel arcilla-PCM con otras soluciones constructivas comercializadas con PCM microencapsulado incorporado

Ref.	Fab.	Nombre de la solución	Material base	mPCM (% m/m)	Espesor (mm)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Temp. fusión (°C)	Entalpía por unidad de masa (kJ/kg)	Entalpía por unidad de superficie (kJ/m <sup>2</sup> )	Entalpía de fusión (kJ/m <sup>2</sup> )
-	-	Prototipo de panel arcilla-PCM	Arcilla estabilizada	Micronal® 28D (20%)	20.0 mm	835.79 kg/m <sup>3</sup>	28°C	42.17 kJ/kg (20-35°C)	704.87 kJ/m <sup>2</sup> (20-35°C)	501.47 kJ/m <sup>2</sup> (20-35°C)
<b>SOLUCIONES COMERCIALIZADAS</b>										
[83] [84] [85]	ebb Eco Building Boards™	PCM Clay Board® 25	Arcilla estabilizada con fibra natural	Micronal® (20%)	14.0 mm	-	25°C	-	-	396 kJ/m <sup>2</sup> (10-30°C)
[84] [86] [87] [88] [89]	DuPont™	Energain® board	Papel de aluminio	Compuesto de cera de parafina y copolímero (60%)	5.26 mm	865.39 kg/m <sup>3</sup>	21.7°C	140 kJ/kg (0-30°C)	630 kJ/m <sup>2</sup>	515 kJ/m <sup>2</sup>
[83] [90]	Knauf GmbH	ComfortBoard®	Yeso	Micronal®	12.5 mm	800 kg/m <sup>3</sup>	23°C	-	460 kJ/m <sup>2</sup> (10-30°C)	200 kJ/m <sup>2</sup> (10-30°C)
[84] [88]		Knauf SmartBoard® 23	Yeso	Micronal® (30%)	15.0 mm	787 kg/m <sup>3</sup>	23°C	-	200 kJ/m <sup>2</sup>	-
		Knauf SmartBoard® 26					26°C	-	330 kJ/m <sup>2</sup>	-
[83] [84]	National Gypsum®	Thermal CORE™	Yeso	Micronal®	12.7 mm	800 kg/m <sup>3</sup>	23°C	-	-	250 kJ/m <sup>2</sup>
[83] [84] [91] [92]	Saint-Gobain Rigips GmbH	Alba® Balance 23	Yeso	Micronal®	25.0 mm	900 kg/m <sup>3</sup>	23°C	-	825 kJ/m <sup>2</sup> (10-30°C)	291 kJ/m <sup>2</sup> (10-30°C)
		Alba® Balance 25					25°C	-	840 kJ/m <sup>2</sup> (10-30°C)	306 kJ/m <sup>2</sup> (10-30°C)
[83] [93] [94]	Datum Phase Change Ltd.	F.E.S-Board®	Yeso reforzado con fibra de vidrio	Micronal®	25.0 mm	-	24°C	-	783 kJ/m <sup>2</sup> (10-30°C)	-
		RACUS® ceiling tile			16.0 mm	-	23°C	-	439.2 kJ/m <sup>2</sup> (10-30°C)	-

**Tabla 27.** Tabla comparativa de las propiedades termo-físicas del prototipo de panel arcilla-PCM con otras soluciones constructivas revisadas en la literatura con PCM microencapsulado incorporado

Ref.	Nombre de la solución	Material base	mPCM (% m/m)	Espesor (mm)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Temp. fusión (°C)	Entalpía por unidad de masa (kJ/kg)	Entalpía por unidad de superficie (kJ/m <sup>2</sup> )	Entalpía de fusión (kJ/kg ó kJ/m <sup>2</sup> )
-	Prototipo de panel arcilla-PCM	Arcilla estabilizada	Micronal® 28D (20%)	20.0 mm	835.79 kg/m <sup>3</sup>	28°C	42.17 kJ/kg (20-35°C)	704.87 kJ/m <sup>2</sup> (20-35°C)	501.47 kJ/m <sup>2</sup> (20-35°C) 30.00 kJ/kg (20-35°C)
<b>SOLUCIONES EN LITERATURA</b>									
[95]	Bio-composite PCM	Arcilla natural, fibras de celulosa y grafito reciclados	Grasas vegetales de confitería (ácidos grasos) (56%)	-	-	34.83° C	-	-	60.41 kJ/kg (5-50 °C)
[96]	PEG600(18%wt)/gypsum composite	Yeso	Poliétilen-glicol PEG600 (18%)	10.0 mm	-	10.55° C	-	-	24.18 kJ/kg (-5-35°C)
	PEG600(22%wt)/natural clay composite	Arcilla natural	Poliétilen-glicol PEG600 (22%)	10.0 mm	-	10.85° C	-	-	28.79 kJ/kg (-5-35°C)
[97]	10%PCM-gypsum wallboard	Yeso	Ácidos grasos y ceras de parafina (10%)	12.7 mm	787.5 kg/m <sup>3</sup>	21.5°C	-	-	192.0 kJ/m <sup>2</sup>
	20%PCM-gypsum wallboard	Yeso	Ácidos grasos y ceras de parafina (20%)	12.7 mm	875 kg/m <sup>3</sup>	21.5°C	-	-	426.7 kJ/m <sup>2</sup>
[98]	Gypsum board with PCM	Yeso	Ácido graso de coco (25%)	12.7 mm	-	24.9°C	24.2 kJ/kg (18.3-29.4°C)	-	-
[99] [100]	PCM gypsum board	Yeso	Heptadecano (parafinas) mejorado con polvo de aluminio (Capa)	12.0 mm	821 kg/m <sup>3</sup>	25°C (22 ~ 26)	-	363.7 kJ/m <sup>2</sup> (20-28°C)	-
[101]	PCM Wallboard-Building Coupled	Yeso	Ceras de parafinas	15.0 mm	767 kg/m <sup>3</sup>	-	-	-	330.0 kJ/m <sup>2</sup>
[102]	Randomly distributed PCM-gypsum board	Yeso	Ceras de parafina (11.8%)	12.5 mm	-	18°C	-	248 kJ/m <sup>2</sup> ( $\Delta T=12^\circ C$ )	120 kJ/m <sup>2</sup> ( $\Delta T=12^\circ C$ )
	Laminated PCM-gypsum board	Yeso	Ceras de parafina (11.8%)	12.5 mm	-	18°C	-	275 kJ/m <sup>2</sup> ( $\Delta T=12^\circ C$ )	145 kJ/m <sup>2</sup> ( $\Delta T=12^\circ C$ )
[80]	Slim board of gypsum with PCM	Yeso reforzado con fibra y plastificante	Micronal® DS 5001X (44.5%)	15.0 mm	-	26°C	67.47 kJ/kg (20-35°C)	705.06 kJ/m <sup>2</sup> (20-35°C)	-
	Thick board of gypsum with PCM	Yeso reforzado con fibra y plastificante	Micronal® DS 5001X (44.5%)	25.0 mm	-	26°C	59.04 kJ/kg (20-35°C)	1050.9 kJ/m <sup>2</sup> (20-35°C)	-
[86]	Wall composition with PCM	Madera, yeso y poliestireno	Energain® board (Capa)	128 mm (PCM: 5.26 mm)	1019 kg/m <sup>3</sup>	21.7°C	-	663.5 kJ/m <sup>2</sup> (0-34°C)	-

### 5.3.2.2. Comparación con soluciones comercializadas y soluciones presentadas en literatura

#### I. Denominación

Se observa en la mayoría de las referencias una ausencia de analogía en la metodología que estructura cada investigación y, por ende, en el compendio de resultados que dispone. El motivo de esta fragmentación, señala [103], podría encontrarse en el factor de incidencia que los objetivos de la investigación, y los métodos de ensayo que se siguen para ello, ejercen sobre el conjunto de parámetros a determinar. No obstante, dado que en la totalidad de los artículos se establece como uno de los objetivos la presentación de una solución constructiva basada en PCM microencapsulado (o, en su defecto, la caracterización térmica de una solución ya presentada), los parámetros agrupados en *Denominación* y *Composición* (ver **Tabla 25**) han podido ser extraídos en todo caso, exceptuando la concentración de PCM (% m/m), cuyo valor se ausenta con mayor frecuencia en las soluciones comercializadas que en las presentadas en la literatura.

#### II. Composición: Material base

El material empleado como base para la fabricación de la solución de panel corresponde, en la gran mayoría de los casos, con algún tipo de yeso o yeso reforzado. La solución comercializada *Energain® board* integra el PCM en forma estabilizada entre dos capas de papel de aluminio [84]; mientras que el *PCM Clay Board® 25* constituye una propuesta alternativa al desarrollar una solución de construcción en seco que incorpora las propiedades de un material tradicional como la arcilla junto a las de un material de cambio de fase. Este panel consta de un soporte de tablero de fibra de 4 mm de espesor, una estructura en panel de papel rellena con una mezcla de arcilla y PCM microencapsulado, una malla de fibra de vidrio de refuerzo y una capa de revestimiento de arcilla de 2 mm de espesor [104] (ver **Fig. 65**). En cuanto a las soluciones revisadas en la literatura, [95] y [96] proponen una solución constructiva de panel compuesto basada en arcilla natural, siendo reforzada con fibra de celulosa y grafito reciclados en el caso de [95]. Por su parte, [86] integra el PCM como una capa más dentro de una solución de muro multicapa, entre el material aislante y el acabado de yeso, como propuesta de mejora térmica, empleando para ello la solución comercializada de *Energain® board*.



Copyright 2013 / www.ebb.im

**Fig. 65.** Panel *PCM Clay Board® 25*, solución constructiva comercializada por ebb Eco Building Boards™. Fuente: [105]

### III. Composición: PCM microencapsulado (mPCM) en fracción de masa (% m/m)

Por su parte, el PCM incorporado a la solución constituye uno de los parámetros clave por los que se ha regido la selección de las referencias a revisar, siendo condición indispensable que se trate de una solución de PCM microencapsulado y, preferiblemente, algún tipo de solución comercializada Micronal®. La búsqueda de la mayor convergencia posible en este parámetro con la propuesta de panel arcilla-PCM aspira a una revisión crítica de las prestaciones de este material de cambio de fase, a través de una amplia variedad de soluciones y porcentajes de concentración (% m/m).

Por ello, a excepción del panel *Energain® board*, la totalidad de las soluciones comercializadas recopiladas para esta revisión incorporan, según indican, algún producto de Micronal®. Las soluciones seleccionadas en la literatura presentan, por otro lado, una mayor diversidad en este sentido, pudiéndose reunir en tres grupos: ácidos grasos, polietilenglicol (PEG), y ceras de parafinas, que en dos de las soluciones [102] se refiere concretamente como solución de Micronal®. [99] se propone evaluar teórica y experimentalmente el comportamiento térmico de un PCM microencapsulado previamente presentado en [100], el cual emplea como materiales base una solución comercializada de heptadecano (obtenido a partir de parafinas) (90%) y un polvo de aluminio (10%) para mejorar sus prestaciones térmicas [100]. Para la evaluación, [99] incorpora el PCM microencapsulado como capa de acabado de una hipotética solución multicapa, junto a un panel de yeso.

La concentración de PCM microencapsulado en cada solución, dada en fracción de masa (% m/m), se ha podido extraer en la mayoría de las soluciones revisadas en la literatura (ver **Fig. 67**), mientras que su valor en las soluciones comercializadas se obvia con mucha más frecuencia (ver **Fig. 66**). En este caso, ante la imposibilidad de encontrar una mayor convergencia con la solución de panel arcilla-PCM, se ha valorado igualmente la variedad de concentraciones de PCM, por enriquecer la comparativa, por un lado, entre las prestaciones de un mismo PCM microencapsulado en porcentajes diversos y, por otro, entre técnicas de microencapsulación distintas que, no obstante, coinciden en la concentración.

Se observa que en la mayoría de las soluciones la concentración del PCM microencapsulado se aproxima a alguno de los valores estudiados durante la caracterización del prototipo de panel arcilla-PCM (10%, 15% y 20%), oscilando en un rango entre 11.8% y 30%, lo cual estaría dotando de consistencia a las consideraciones seguidas para la fabricación y ensayo de las muestras del prototipo. No obstante, al mismo tiempo, entre las referencias que incluyen información sobre la concentración de PCM, se observa cierto número de artículos donde el porcentaje de concentración es superior o muy superior a los valores máximos de concentración recomendados (30%) para garantizar las propiedades mecánicas y de resistencia al fuego del panel final [65,66,72]. Salvo por dos excepciones que se comentan a continuación, estos artículos no refieren en ningún caso ensayos que evalúen las prestaciones mecánicas y de resistencia al fuego de la solución de panel propuesta, lo que imposibilita la verificación del cumplimiento de las exigencias correspondientes. Sólo [95] incluye ensayos para la caracterización mecánica de la solución (con un 56% de PCM incorporado), resultando un valor de resistencia a compresión de 2.83 MPa para la misma, un valor que, según [95], se conserva dentro de los valores aceptables para aplicaciones no portantes en edificación. Por su parte, la documentación técnica del panel *Energain® board* (con un 60% de PCM incorporado) [87] carece de información más allá de la designación de la Clase E (resistencia durante un

período breve) a la solución, según la clasificación de reacción al fuego de la normativa UNE-EN 11925-2.

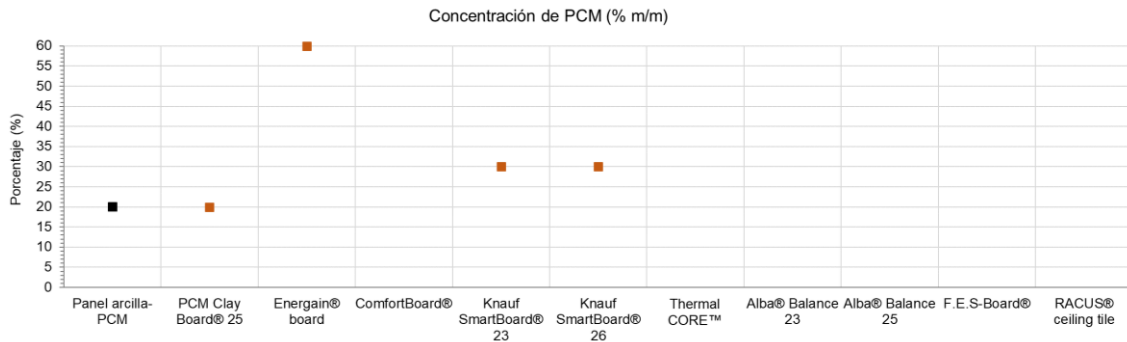


Fig. 66. Comparación de la concentración de PCM en fracción de masa (% m/m) del prototipo de panel arcilla-PCM con las soluciones comercializadas

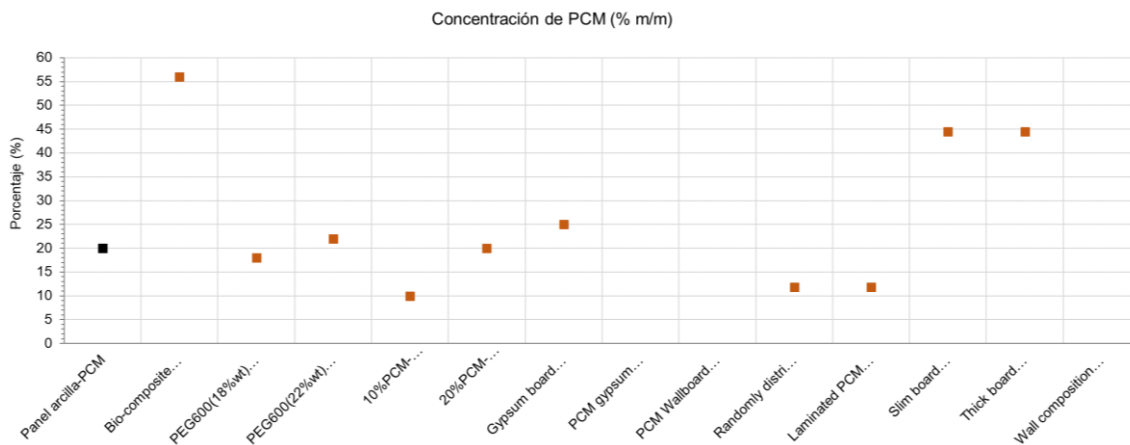


Fig. 67. Comparación de la concentración de PCM en fracción de masa (% m/m) del prototipo de panel arcilla-PCM con las soluciones presentadas en literatura

#### IV. Propiedades físicas: Espesor

El espesor de la solución constructiva se ha podido extraer para la totalidad de los casos, exceptuando [95], donde la propuesta de panel se caracteriza con inconsistencia y los parámetros agrupados en *Propiedades físicas* no se refieren. Por un lado, el espesor de las soluciones comercializadas presenta una diversidad relativa (ver Fig. 68), pudiendo ser agrupadas según su espesor en dos categorías de paneles: paneles finos (>16.0 mm) y paneles muy finos (≤16.0 mm). A la primera categoría corresponden el 40% de los artículos revisados, mientras que en la categoría de paneles muy finos se incluyen el 60% de artículos restantes. El espesor de los paneles para los que esta dimensión supera los 16.00 mm corresponde en todos los casos con un valor de 25.0 mm, lo que significa que un 40% de estos productos se comercializa con un espesor de 25.0 mm, pudiendo ser considerada una dimensión beneficiosa, o cuanto menos competitiva, en una propuesta de mejora térmica de estas características. Los paneles categorizados como paneles muy finos, por su parte, oscilan en un rango de valores más amplio, aunque relativamente reducido, siendo de 2.5 mm la mayor diferencia entre ellos.

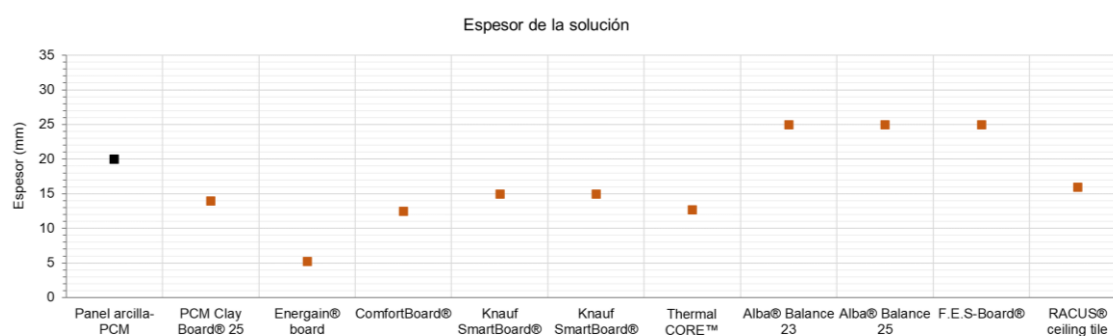


Fig. 68. Comparación del espesor del prototipo de panel arcilla-PCM con las soluciones comercializadas

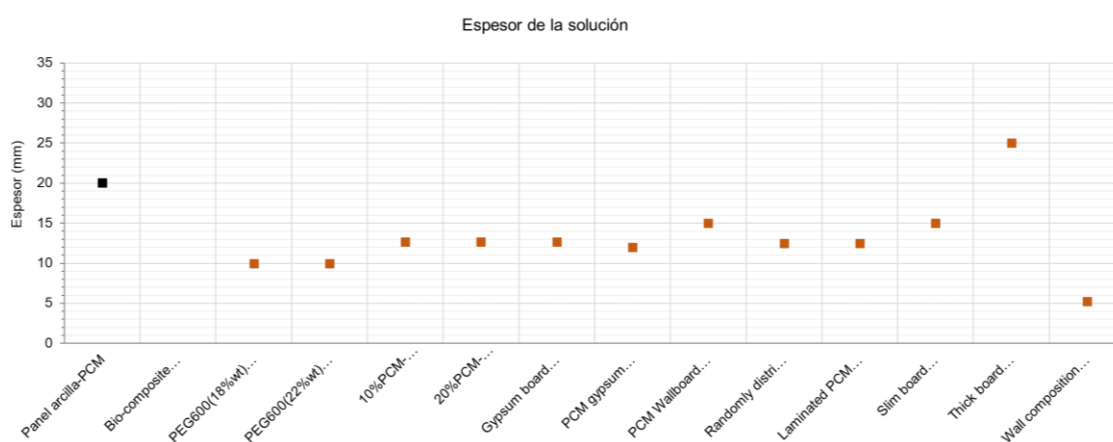


Fig. 69. Comparación del espesor del prototipo de panel arcilla-PCM con las soluciones presentadas en literatura

Por otro lado, la categorización de las soluciones presentadas en la literatura según su espesor no resulta tan equilibrada como en el caso de las soluciones comercializadas (ver Fig. 69). Prácticamente la totalidad de las soluciones corresponden a la segunda categoría de paneles muy finos ( $\leq 16.0$  mm), a excepción de [80] donde una de las muestras para los ensayos (referida como “panel grueso”) se caracteriza con un espesor de 25.0 mm. Cabe aclarar que, en el caso de [86], la evaluación de la capa de PCM se lleva a cabo integrada como una capa más en una solución de muro multicapa, como ya se ha referido en párrafos anteriores. Si bien la solución comercializada de panel *Energain® board* que se emplea como capa de PCM presenta un espesor de tan sólo 5.26 mm, la solución constructiva compuesta para los ensayos cuenta con un espesor total de 128 mm.

El prototipo de panel arcilla-PCM se incluiría en la categoría de paneles finos y el valor de su espesor (20.0 mm) se hallaría ligeramente desplazado de la media de valores en el total de soluciones ( $\approx 14.0$  mm), lo que advierte un interés en variar de manera conservativa este parámetro en futuras adaptaciones del panel hacia su optimización.

Se destaca como un caso particular en la correlación entre los parámetros de concentración de PCM (% m/m) y de espesor la solución de panel *Energain® board*, el cual presenta el valor más elevado de concentración de PCM (60%) y, al mismo tiempo, el espesor más reducido (5.26 mm), encontrándose ambos valores marcadamente distanciados de la mediana en ambos parámetros. Esta excepcionalidad conduce a hipotetizar sobre una posible estrategia de optimización de las prestaciones térmicas

diversa al resto de soluciones revisadas. Si bien se trata de una solución actualmente comercializada, la conveniencia y eficiencia de la misma habría de ser contrastada y evaluada accediendo para ello a literatura de mayor extensión y detalle sobre la metodología seguida, las condiciones de ensayo y evaluación, y los resultados obtenidos.

### V. Propiedades físicas: Densidad

La densidad de las soluciones constructivas ha podido ser extraída sólo en aproximadamente la mitad de las referencias revisadas, siendo un factor común entre ellas el uso de algún tipo de yeso como material base (ver **Fig. 70-71**). Para tales casos, la densidad oscila en un rango de valores relativamente reducido, entre 787 y 1019 kg/m<sup>3</sup>, apreciando la influencia en su cálculo de parámetros como el material base del compuesto, el tipo de PCM microencapsulado y la concentración de éste (% m/m). La densidad de la solución de muro multicapa en [86] (1019 kg/m<sup>3</sup>) se distancia marcadamente del rango de densidades predominante (787- 900 kg/m<sup>3</sup>), si bien se encuentra coherente dada su configuración. Por su parte, el prototipo de panel arcilla-PCM con la densidad calculada según su composición (835.79 kg/m<sup>3</sup>) se posicionaría de manera casi exacta en la media calculada de las densidades incluidas en las referencias revisadas. Esta condición de valor medio refuerza la competitividad del prototipo dentro de su campo de investigación y fabricación, dada además su influencia en el cálculo de la capacidad de almacenamiento térmico por unidad de superficie de la solución.

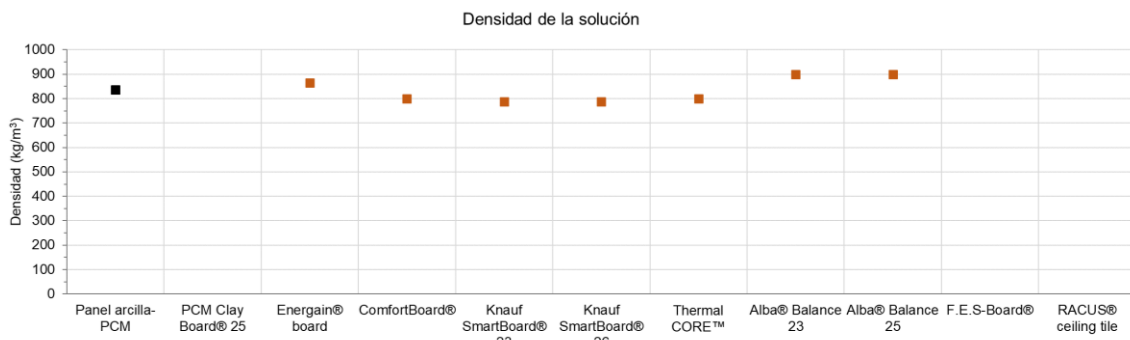


Fig. 70. Comparación de la densidad del prototipo de panel arcilla-PCM con las soluciones comercializadas

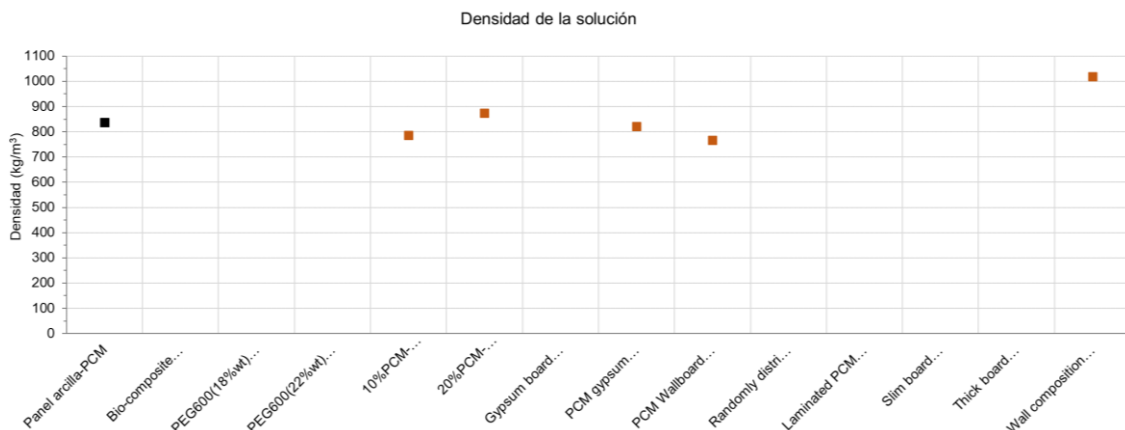
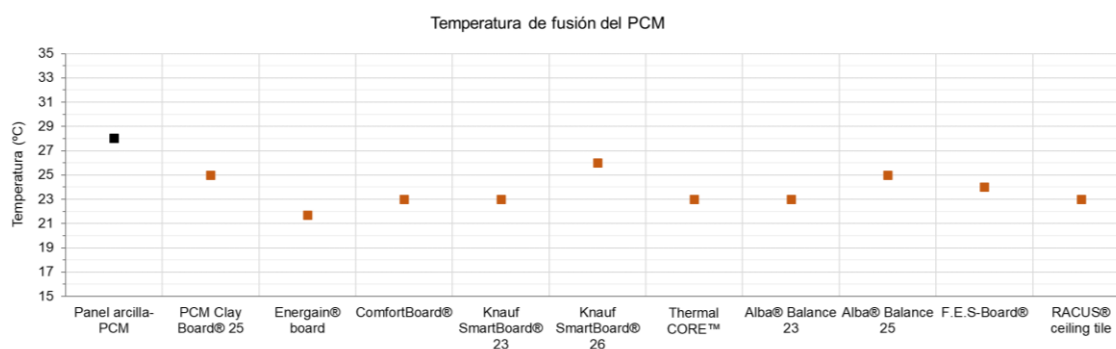


Fig. 71. Comparación de la densidad del prototipo de panel arcilla-PCM con las soluciones presentadas en literatura

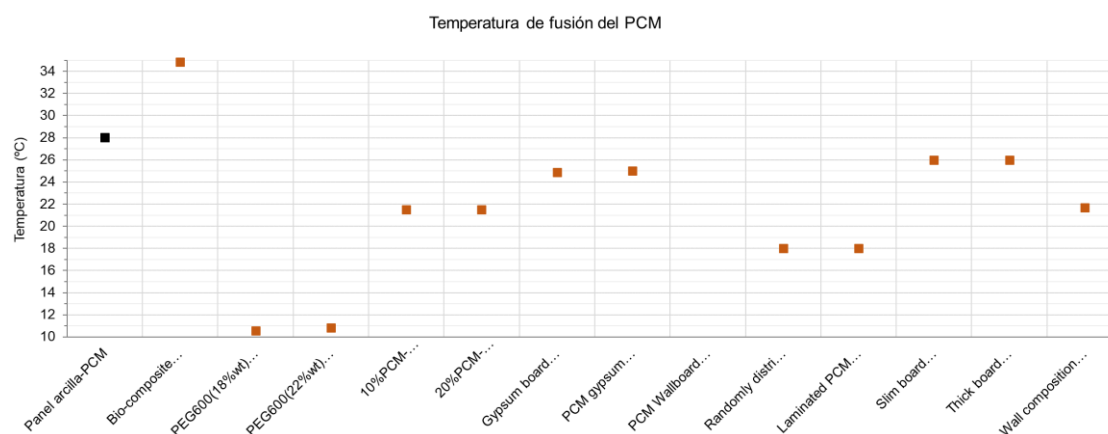


## VI. Propiedades térmicas: Temperatura de fusión del PCM

El valor de la temperatura de fusión del PCM microencapsulado se ha podido extraer para la totalidad de los casos, a excepción de [101], en el que sólo se refiere de manera inconsistente la distribución de la entalpía de fusión en un rango de temperatura de cambio de fase de 20-26°C. Por un lado, la temperatura de fusión de las soluciones comercializadas presenta una diversidad muy reducida (ver **Fig. 72**); teniendo en cuenta que el 50% de las soluciones comercializadas refiere una temperatura de fusión de 23°C, el 20% se define con temperatura de fusión de 25°C, y el 30% restante (3 referencias) indica una temperatura de fusión de 21.7°C para *Energain® board* [87], 24°C para *F.E.S-Board®* [94] y 26°C para *Knauf SmartBoard® 26* [90]. Nuevamente, el panel *Energain® board* destaca por la particularidad de su caracterización, al presentar una temperatura de fusión (21.7°C) particularmente distante en el rango de temperaturas medias que caracteriza un clima mediterráneo en período estival.



**Fig. 72.** Comparación de la temperatura de fusión del PCM del prototipo de panel arcilla-PCM con las soluciones comercializadas



**Fig. 73.** Comparación de la temperatura de fusión del PCM del prototipo de panel arcilla-PCM con las soluciones presentadas en literatura

Por otro lado, la temperatura de fusión del PCM microencapsulado en las soluciones presentadas en literatura oscila en un rango de valores de mayor diversidad (ver **Fig. 73**), entre 18°C y 34.28°C, refiriendo un valor más específico y agrupable casi exclusivamente entre las variantes de solución propuesta en un mismo artículo. Las soluciones propuestas



en [98] y [99] podrían sumarse al 20% de las soluciones comercializadas que refieren una temperatura de fusión de 25°C. Por su parte, las dos variantes de solución basada en yeso presentadas en [80] emplean como PCM microencapsulado el Micronal® DS 5001X y presentan la misma temperatura de fusión (26°C) que la solución comercializada *Knauf SmartBoard® 26* [90]. Asimismo, las dos variantes de panel de yeso-PCM presentadas en [97] indican una temperatura de fusión (21.5°C) muy similar a la solución comercializada *Energain® board* [87]. Por tanto, estas dos variantes también se caracterizan por una temperatura de fusión particularmente distante en el rango de temperaturas medias para el período estival de un clima mediterráneo. Un mayor distancia se detecta, en este sentido, entre las soluciones basadas en yeso presentadas en [95], [96] y [102], para las que se refiere una temperatura de fusión del PCM de 34.83°C, de 10.55°C y de 18°C, respectivamente. [96] justifica la integración de un PCM de tales características en su objetivo de desarrollar una propuesta de sistema de almacenamiento térmico para aplicaciones de baja temperatura, una condición que estaría desviando a esta investigación del resto de referencias revisadas, a pesar del interés que podía suscitar por el uso de arcilla natural como material base de la solución.

En este parámetro, si bien presenta un valor de temperatura de fusión (28°C) dentro del rango de temperaturas de un clima mediterráneo en período estival, el prototipo de panel arcilla-PCM se distancia en más de 2°C de la mediana en las soluciones revisadas, lo que lleva a considerar como pertinente, e incluso necesario, la consideración de cierto rango de temperaturas de fusión alternativas, especialmente aquellas que caracterizan a las soluciones actualmente comercializadas (esto es, entre 23°C y 26°C), para la fase de simulación y evaluación de los criterios óptimos para la solución del capítulo siguiente.

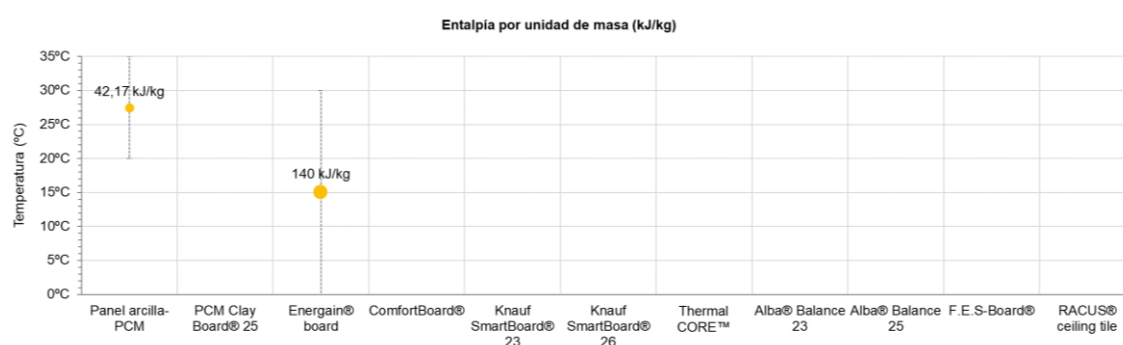
## VII. Propiedades térmicas: Entalpía por unidad de masa

Para concluir, el resto de parámetros agrupados en *Propiedades térmicas* (ver **Tabla 25**), referidos a la capacidad de almacenamiento térmico de la solución por unidad de masa y de superficie, constituyen el conjunto de parámetros que mayor dificultad ha presentado para su extracción. Otra condición indispensable en la selección de las referencias a revisar ha sido la identificación de alguno de estos parámetros restantes, relativos a la entalpía: Entalpía por unidad de masa (kJ/kg), Entalpía por unidad de superficie (kJ/m<sup>2</sup>) y Entalpía de fusión (kJ/kg ó kJ/m<sup>2</sup>).

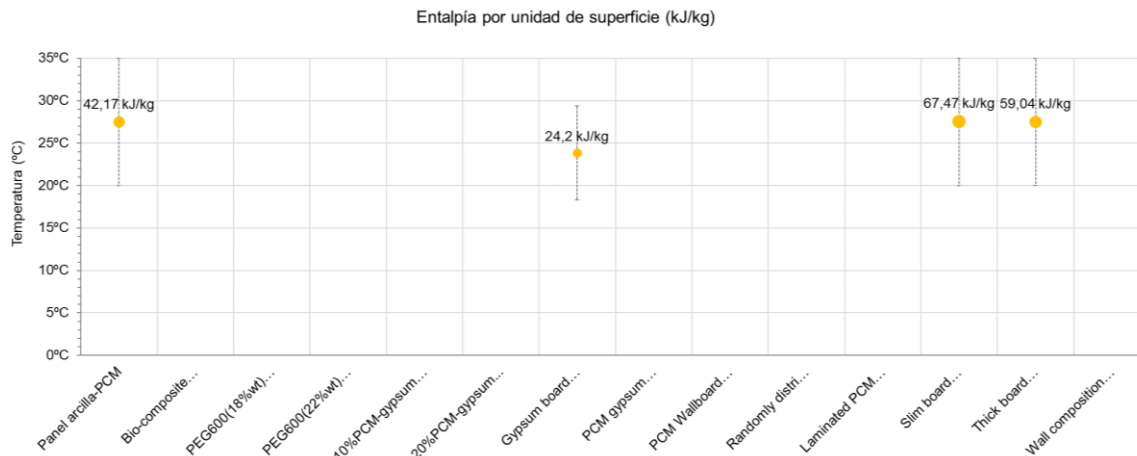
No obstante, la previamente comentada fragmentación entre las metodologías seguidas y la diversidad en las condiciones de incorporación del PCM y métodos de ensayo, así como la inconsistencia en la presentación de sus resultados, llevan a asumir que los datos sobre la capacidad de almacenamiento térmico de las soluciones revisadas no son directamente comparables, a partir de la información proporcionada en las referencias. De ahí que, a fin de poder indicar una mínima caracterización térmica de las referencias, se decida ampliar la comparación con la incorporación del parámetro de entalpía de fusión (kJ/kg ó kJ/m<sup>2</sup>), el cual, no obstante, se ha de tener en cuenta que supone una caracterización sesgada de la solución propuesta.

El valor de la entalpía por unidad de masa se ausenta en casi la totalidad de las soluciones, tanto comercializadas como presentadas en la literatura. Sólo una de las soluciones comercializadas, el panel *Energain® board*, ha podido ser caracterizada con este parámetro (ver **Fig. 74**), para el que se refiere un valor de 140 kJ/kg (recuérdese: con un 60% de PCM incorporado), para una diferencia de temperatura de 30°C (0-30°C), un valor

que, no obstante, no se ha obtenido a partir de la documentación técnica del fabricante, sino de referencias adicionales en las que se realizan estudios experimentales [89]. Por su parte, entre las soluciones presentadas en literatura, sólo tres de ellas incluyen la entalpía por unidad de masa (ver **Fig. 75**), cuyo valor oscila entre 24.2 kJ/kg y 67.47 kJ/kg, en un rango de temperatura relativamente equiparable (11.1°C en un caso [98] y 15°C en los otros dos [80]). La oscilación entre estos valores se podría vincular a la capacidad calorífica aparente del PCM microencapsulado y a la concentración del mismo en la solución, detectándose un mayor porcentaje de ésta en los dos casos que presentan una mayor entalpía.



**Fig. 74.** Comparación de la entalpía por unidad de masa (kJ/kg) del prototipo de panel arcilla-PCM con las soluciones comercializadas, junto a la diferencia de temperatura en la que ha sido medida

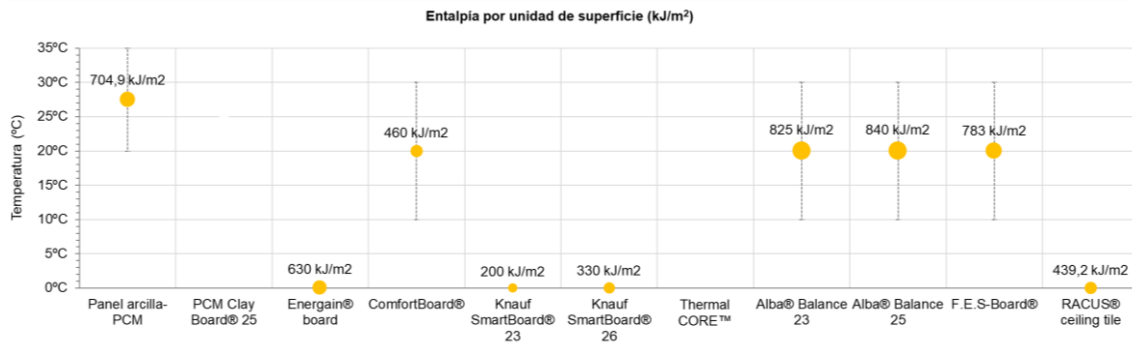


**Fig. 75.** Comparación de la entalpía por unidad de masa (kJ/kg) del prototipo de panel arcilla-PCM con las soluciones en literatura, junto a la diferencia de temperatura en la que ha sido medida

El prototipo de panel arcilla-PCM, con un valor de entalpía por unidad de masa de 42.17 kJ/kg para una diferencia de temperatura de 15°C (20-35°C), no puede ser evaluado de manera coherente según este parámetro por la falta de información en la mayoría de las referencias. No obstante, sí se observa que su reducido valor frente a las soluciones basadas en yeso reforzado [80] se podría explicar, en parte, al observar que la concentración del Micronal® DS 5001 X en [80] (44.5%) supone más del doble del valor de concentración de Micronal® 28D en el prototipo (20%).

VIII. Propiedades térmicas: Entalpía por unidad de superficie

La entalpía por unidad de superficie, por el contrario, se ha podido extraer para casi la totalidad de las soluciones comercializadas (ver **Fig. 76**), gracias a, cabe decir, la información extraída de las referencias adicionales en las que estas soluciones se estudian experimentalmente [83,84]. El valor de entalpía por unidad de superficie oscila en un rango considerablemente amplio entre 200 kJ/m<sup>2</sup> y 840 kJ/m<sup>2</sup>.



Nota: Los valores de entalpía por unidad de superficie coincidentes con el eje x corresponden a aquellas soluciones comercializadas en las que ha sido posible extraer el valor de la entalpía, pero no el gradiente de temperatura en el que ha sido medida.

**Fig. 76.** Comparación de la entalpía por unidad de superficie (kJ/m<sup>2</sup>) del prototipo de panel arcilla-PCM con las soluciones comercializadas, junto a la diferencia de temperatura en la que ha sido medida

No obstante, caben ciertas observaciones. Entre las soluciones comercializadas, el prototipo de panel arcilla-PCM presenta el cuarto valor más elevado para la entalpía por unidad de superficie del panel (704.87 kJ/m<sup>2</sup>). Además del valor de la entalpía, para un 60% de las soluciones se ha podido extraer también la diferencia de temperatura en la que se ha medido, obteniéndose para todos los casos una diferencia de temperatura de 20°C (10-30°C). Dado que la diferencia de temperatura para los ensayos del prototipo de panel arcilla-PCM es de 15°C (20-35°C), los resultados para la capacidad de almacenamiento térmico podrían llegar a ser relativamente comparables en estos casos. No obstante, dado que, como ya se ha analizado previamente, en la mayoría de las soluciones comercializadas, no ha sido posible extraer la concentración de PCM, se impide toda posibilidad de aproximación a una comparativa coherente. Los valores más próximos a la entalpía por unidad de superficie del panel arcilla-PCM corresponden a tres soluciones basadas en yeso (*Alba® Balance 23*, *Alba® Balance 25* y *F.E.S-Board®*) que también emplean un tipo (no especificado) de PCM Micronal®, pero con un espesor de solución 5.0 mm mayor que el panel arcilla-PCM, aunque con temperaturas de fusión del PCM inferiores (23°C, 24°C y 25°C) a la del prototipo (28°C).



Fig. 77. Panel *Alba® Balance 25*, solución constructiva a base de yeso, comercializada por Saint-Gobain Rigips GmbH

En cuanto a las soluciones presentadas en literatura, por el contrario, el valor de la entalpía por unidad de superficie se ausenta con más frecuencia, en casi la mitad de las soluciones revisadas (ver Fig. 78). El valor de entalpía por unidad de superficie oscila en un rango considerable, más amplio que en las soluciones comercializadas, entre 248 kJ/m<sup>2</sup> y 1050.9 kJ/m<sup>2</sup>. Considerando las observaciones ya realizadas para las soluciones comercializadas, sólo cabe un apunte respecto a las soluciones basadas en yeso reforzado presentadas en [80]. Se detectan notables similitudes entre estas soluciones y el prototipo de panel arcilla-PCM, al incorporar aquéllas como PCM microencapsulado otro tipo de Micronal® (DS 5001 X) y presentar una diferencia de temperatura idéntica en la medición de la entalpía de 15°C (20-35°C). Ahora bien, por un lado, la solución de panel yeso-PCM de 15.0 mm (*Slim board*) [80] presenta una entalpía por unidad de superficie de 705.06 kJ/m<sup>2</sup>, un valor inferior al prototipo de panel arcilla-PCM (705.06 kJ/m<sup>2</sup>), contando con 5.0 mm menos de espesor que el prototipo pero con 24.5% más de concentración de PCM. Por otro lado, la otra solución de panel yeso-PCM de 25.0 mm (*Thick board*) [80] presenta una entalpía por unidad de superficie de 1050.9 kJ/m<sup>2</sup>, un valor muy superior al prototipo de panel arcilla-PCM (705.06 kJ/m<sup>2</sup>), aunque, en este caso, el panel yeso-PCM cuenta con 5.0 mm más de espesor que el prototipo y, además, un 24.5% más de concentración de PCM.

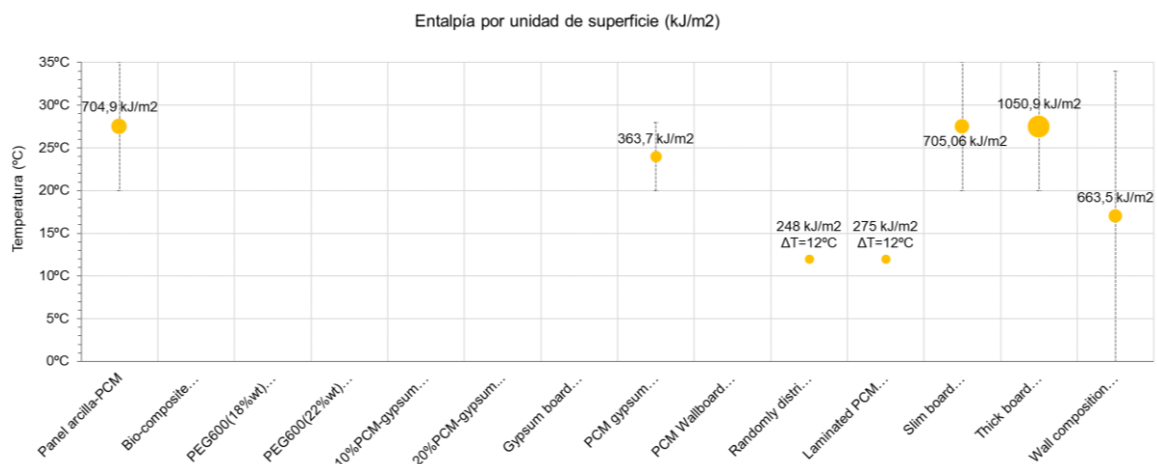


Fig. 78. Comparación de la entalpía por unidad de superficie (kJ/m<sup>2</sup>) del prototipo de panel arcilla-PCM con las soluciones en literatura, junto a la diferencia de temperatura en la que ha sido medida

## IX. Propiedades térmicas: Entalpía de fusión

Por último, como ya se ha indicado, el valor de la entalpía de fusión (por unidad de masa o de superficie) ha sido incorporado a la revisión como parámetro adicional a fin de poder indicar una mínima caracterización térmica de ciertas referencias de interés, en las que no se proporcionaba ningún otro valor de entalpía, especialmente en las soluciones presentadas en literatura y en la documentación técnica de las soluciones comercializadas. Es el caso de las soluciones presentadas en [95,97,101], destacando en la comparativa el panel de yeso con un 20% de PCM microencapsulado al presentar la misma concentración que el prototipo de panel arcilla-PCM, además de emplear también ceras de parafina en el compuesto. No obstante, al no disponer de la diferencia de temperatura en la que la entalpía ha sido medida, no es posible realizar una comparativa según este parámetro. Frente al prototipo, la solución de yeso cuenta con un espesor 7.3 mm menor y con una densidad ligeramente mayor.

Destaca en esta comparativa la convergencia de parámetros detectada entre el prototipo de panel arcilla-PCM y la solución comercializada de panel *PCM Clay Board® 25*, la cual no sólo incorpora la misma concentración (20%) de PCM microencapsulado Micronal®, sino que también emplea el mismo materia base (arcilla estabilizada con fibras naturales). A pesar de que el valor de la entalpía de fusión también ha sido medido para una diferencia de temperatura bastante similar en ambas soluciones, la capacidad de almacenamiento térmico entre ellas sigue sin resultar directamente comparable por falta de información en la caracterización y ensayo de la solución comercializada. Para una diferencia de temperatura en la medición 5°C más reducida, el prototipo de panel arcilla-PCM presenta un valor de entalpía de fusión muy superior a la solución *PCM Clay Board® 25*, aunque ésta presenta un espesor total 6.0 mm menor que el prototipo. En cualquier caso, el estudio del proceso de fabricación de la solución comercializada ha supuesto aportes notables para futuras investigaciones sobre el prototipo de panel mediante un trabajo más experimental.

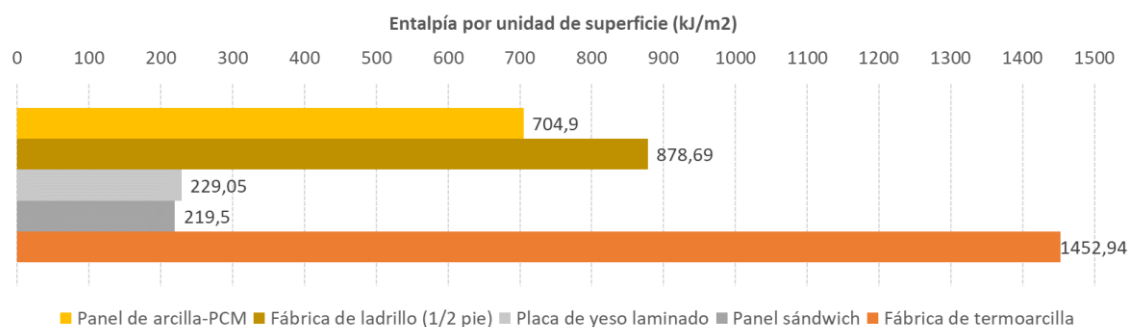
### 5.3.2.3. Comparación con soluciones convencionales

Adicionalmente, tal y como se refirió al principio, se compara el panel arcilla-PCM con una serie de soluciones constructivas convencionales caracterizadas a partir de los ensayos realizados en [80] (ver **Tabla 28**). Se encuentra pertinente este análisis comparativo entre la solución de arcilla-PCM y las soluciones convencionales, las cuales carecen de material de cambio de fase y, por ende, de capacidad de almacenamiento térmico latente, dado que la entalpía por unidad de masa y de superficie ha sido medida en todas ellas dentro de un mismo rango de temperatura de 15°C (20-35°C), correspondiente al rango en el que se ha caracterizado el prototipo de panel arcilla-PCM.

**Tabla 28.** Tabla comparativa de las propiedades termo-físicas del prototipo de panel arcilla-PCM con otras soluciones constructivas convencionales sin PCM

Ref.	Fab.	Nombre de la solución	Material base	mPCM (% m/m)	Espesor (mm)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Temp. fusión (°C)	Entalpía por unidad de masa (kJ/kg)	Entalpía por unidad de superficie (kJ/m <sup>2</sup> )
-	-	Prototipo de panel arcilla-PCM	Arcilla estabilizada	Micronal® 28D (20%)	20.0 mm	835.79 kg/m <sup>3</sup>	28°C	42.17 kJ/kg (20-35°C)	704.87 kJ/m <sup>2</sup> (20-35°C)
<b>SOLUCIONES CONVENCIONALES</b>									
[80]	-	Panel sándwich	Aluminio y material aislante	Sin PCM	115 mm	-	-	21 kJ/kg (20-35°C)	219.50 kJ/m <sup>2</sup> (20-35°C)
[80]	-	Panel de yeso	Yeso	Sin PCM	15 mm	-	-	19.09 kJ/kg (20-35°C)	229.05 kJ/m <sup>2</sup> (20-35°C)
[80]	-	Fábrica de ladrillo (1/2 pie)	Arcilla cocida	Sin PCM	120 mm	-	-	8.49 kJ/kg (20-35°C)	878.69 kJ/m <sup>2</sup> (20-35°C)
[80]	-	Fábrica de termoarcilla	Arcilla cocida	Sin PCM	140 mm	-	-	10.02 kJ/kg (20-35°C)	1452.94 kJ/m <sup>2</sup> (20-35°C)

Por un lado, se observa las mejoras en la capacidad de almacenamiento térmico que supone la incorporación de un material de cambio de fase en una solución constructiva, como consecuencia de la capacidad calorífica latente añadida que aporta dicho material. La capacidad de almacenamiento térmico por unidad de superficie que confiere el prototipo de panel arcilla-PCM, con 20.0 mm de espesor, supone una mejora de un 321% frente a la capacidad de un panel sándwich de 112.0 mm, y de un 308% frente a la capacidad de un panel de yeso de 15.0 mm (es decir, de un espesor 5.0 mm más fino que el panel arcilla-PCM). Esto significa que el prototipo de panel arcilla-PCM con una concentración de PCM microencapsulado del 20% podría llegar a triplicar la capacidad de almacenamiento térmico de soluciones convencionales ligeras de bajo espesor, como el panel de yeso o el panel sándwich. Por otro lado, las soluciones de fábrica de ladrillo de ½ pie y de fábrica de termoarcilla presentan una entalpía por unidad de superficie superior en un 124% y en un 206% al valor del panel arcilla-PCM, una mejora que, no obstante, supone un espesor de solución 6 veces superior al del prototipo de panel. En cualquier caso, en esta comparativa con las soluciones de fábrica, se ha de distinguir entre la aplicación final de éstas en sistemas estructurales, con las correspondientes prestaciones mecánicas, y las propuestas de aplicación del prototipo de panel arcilla-PCM y sus objetivos de implementación. Por ello, este cruce de valores se ha de revisar como una aproximación a la potencialidad que la incorporación de soluciones basadas en arcilla y PCM puede conferir al acondicionamiento eficiente de espacios interiores frente a otras soluciones convencionales de acabado.



**Fig. 79.** Comparación de la entalpía por unidad de superficie (kJ/m<sup>2</sup>) del prototipo de panel arcilla-PCM con otras soluciones constructivas convencionales sin PCM

#### 5.3.2.4. Conclusiones de la comparación

Dada la particularidad de las condiciones de contorno y de las exigencias de implementación, así como la configuración adicional de mejora con la que se evalúa cada solución, en ninguno de los casos se puede concluir que la variación de alguno de los parámetros de la solución, o su asimilación a partir de la caracterización térmica de otra solución revisada, se pueda traducir directamente en una mejora de su capacidad de almacenamiento térmico. Esta observación se acentúa ante la falta de información pormenorizada y más contextualizada, la fragmentación metodológica e incluso, en ocasiones, la inconsistencia en la presentación de resultados que se reconoce en la mayoría de las referencias incluidas en la revisión, al menos en el formato de artículo o de ficha técnica con que se recogen.

En este sentido, si bien sería posible asumir las mejoras en la capacidad de almacenamiento térmico latente que idealmente supondría, por ejemplo, el aumento de la concentración de PCM microencapsulado en la solución, se han de incluir también sus efectos e interacciones con otros parámetros relativos a la solución (tipo de microencapsulación, temperatura de fusión y capacidad calorífica aparente del PCM, espesor y densidad de la solución, rango de temperatura abarcado en ensayos) y relativos al contexto (oscilación de la temperatura exterior, caracterización del resto de elementos constructivos, horarios de ocupación y operación, sistemas auxiliares, rango de confort).

En cualquier caso, cabe destacar que, en la totalidad de las referencias revisadas, los resultados de la investigación permiten presentar evidencias de que, siguiendo un diseño e implementación apropiados, las soluciones mejoradas con PCM pueden contribuir a la reducción de la demanda energética en los edificios, garantizando, al mismo tiempo, el confort en el interior de los mismos. Asimismo, en un número notable de referencias, se destaca la importancia de los parámetros relativos al contexto, de las aplicaciones específicas que persigue la implementación y del diseño de métodos de control para el comportamiento óptimo de las soluciones.





## 6. Evaluación de alternativas de aplicación a través de modelos numéricos

### 6.1. Método computacional

Una vez caracterizada la solución constructiva basada en arcilla y PCM, en este capítulo se analizan y evalúan estrategias de implementación de la misma en edificación, siguiendo para ello la metodología desarrollada por Lizana et al. [106], la cual posibilita la evaluación de alternativas basadas en PCM a través de su simulación numérica mediante el software TRNSYS. El objetivo del capítulo lo constituye pues la simulación de diversas soluciones de implementación del panel arcilla-PCM, cuyos resultados aporten en el análisis y la definición de estrategias, exigencias y parámetros clave para una implementación efectiva de paneles basados en arcilla y PCM microencapsulado como estrategia de acondicionamiento pasivo de espacios interiores.

El capítulo se estructura en los siguientes apartados: (6.2) presentación y caracterización del caso de estudio y los escenarios definidos para la evaluación; (6.3) modelado numérico de la simulación del caso de estudio para los distintos escenarios; y (6.4) resultados de la simulación. Por su parte, el modelado numérico del caso de estudio se subdivide, a su vez, en cinco fases, las cuales se definen detalladamente en los respectivos subapartados, y se ilustran en el esquema de metodología (**Fig. 80**): (6.3.1) el modelado del caso de estudio (geometría, caracterización constructiva, horarios de ocupación, índices de infiltración y ventilación, y las ganancias/pérdidas internas); (6.3.2) la calibración y validación del modelo; (6.3.3) la capa de panel arcilla-PCM, caracterizada en base a los resultados obtenidos en el capítulo anterior; (6.3.4) los modos de operación y (6.3.5) los indicadores de comportamiento del modelo numérico.

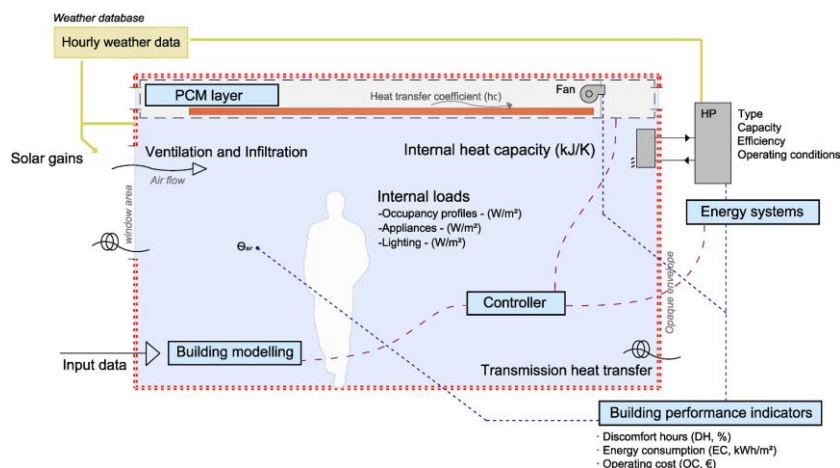


Fig. 80. Esquema de la metodología, desarrollado por Lizana et al., para la simulación numérica y la relación entre las partes del modelo numérico. Fuente: [106]

## 6.2. Definición de caso de estudio y escenarios

### 6.2.1. Escenario base

Como caso de estudio, se selecciona el centro docente IES Chaves Nogales (ver **Fig. 81**), ubicado en el barrio de Sevilla Este, en la ciudad de Sevilla (España), e inaugurado en el año 2013 para dar respuesta a la creciente demanda del barrio desde la última década del siglo XX. Su carácter de nueva construcción garantiza, por tanto, su ejecución bajo la normativa técnica de obligado cumplimiento tras la regulación y publicación del CTE. Esto, junto a la particular implicación del centro en materias de educación ambiental, ha permitido integrarlo en diversos programas de evaluación y medición para la investigación y la optimización de edificios de uso docente bajo la aplicación del CTE [107]. Se disponen así de los datos obtenidos por los trabajos de medición desarrollados por el grupo de investigación TEP954 en el marco del proyecto europeo *ClimACT. Acting for the transition to a low carbon economy in schools - development of support tools* [108], medidos en el interior del aula durante el período estival del año 2020.

El clima mediterráneo que caracteriza a la ciudad de Sevilla presenta, por un lado, unos inviernos húmedos con temperaturas suaves, oscilante entre los 11 y 13°C (con una temperatura media mínima y máxima de entre 7-9°C y 16-18°C, respectivamente). Por otro lado, en lo que respecta al período estival, la ciudad cuenta con veranos secos y calurosos, caracterizados por una temperatura oscilante entre los 25 y 29°C (con una temperatura media mínima y máxima de entre 19-22°C y 31-36°C, respectivamente) [106].

Con una configuración de bloque abierto en su frente meridional, el centro educativo dispone de un patio abierto cercado a este y oeste por dos piezas rectangulares que contienen el programa docente, concentrando la circulación vertical y horizontal entre las dos piezas en el frente septentrional.

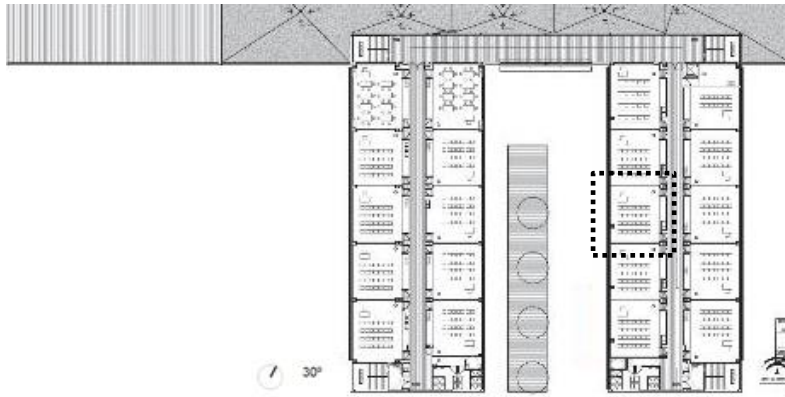


**Fig. 81.** Caso de estudio. Centro docente IES Chaves Nogales con el aula seleccionada para la evaluación de las soluciones alternativas basadas en panel arcilla-PCM. Fuente: Google Earth. Editado.

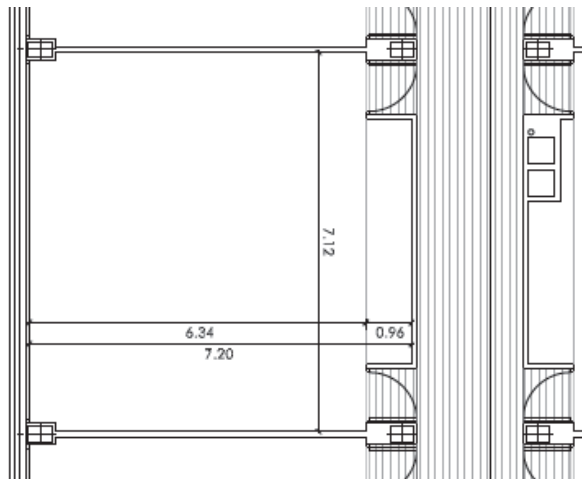
El caso de estudio para la evaluación de las soluciones basadas en el panel arcilla-PCM lo constituye, concretamente, una de las aulas tipo que se distribuyen de manera serial a lo largo de las dos piezas simétricas. Dicha aula se ubica en el punto más céntrico de una de ellas, en la fachada orientada al Oeste. Como el resto de aulas de la tipología, el aula de referencia dispone de una fachada en contacto con el exterior (en este caso, en su cara

oeste), de una partición interna (al Este) que la separa del pasillo de circulación interior de la pieza programática, y de dos particiones laterales que la separan de las aulas contiguas en la disposición serial. La localización y geometría del aula tipo seleccionada como caso de estudio se ilustra en la **Fig. 82** y la **Fig. 83**.

El escenario base (E0) lo constituye el caso de estudio en su estado actual, el cual carece de cualquier solución a base de PCM, y cuya caracterización constructiva se ilustra en la **Fig. 84**, y se detalla en la **Tabla 29**.



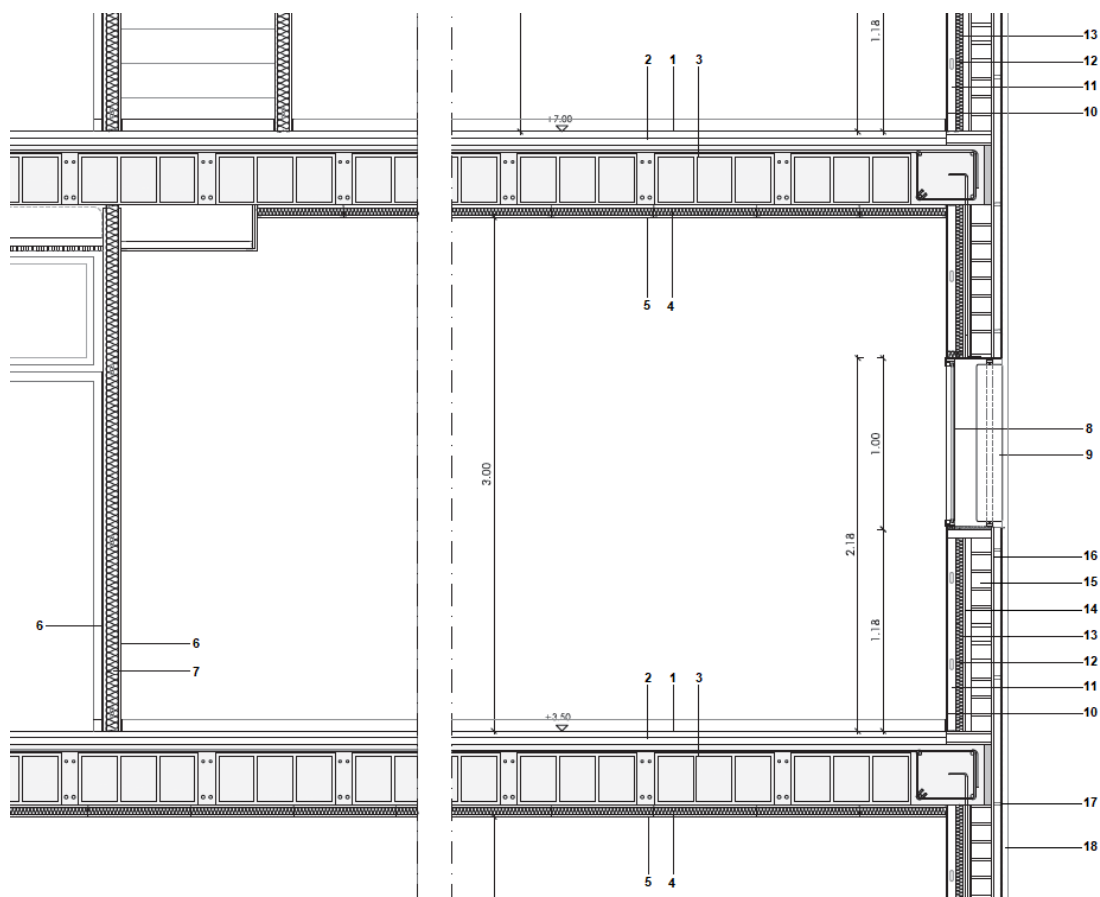
**Fig. 82.** Caso de estudio. Centro docente IES Chaves Nogales con el aula seleccionada para la evaluación de las soluciones alternativas basadas en panel arcilla-PCM. Fuente: Información facilitada por APAE (Agencia Pública Andaluza de Educación). Editado.



**Fig. 83.** Caso de estudio. Acotado del aula seleccionada para la evaluación de las soluciones alternativas basadas en panel arcilla-PCM. Fuente: Información facilitada por APAE (Agencia Pública Andaluza de Educación). Editado.

**Tabla 29.** Caracterización constructiva de los elementos del caso de estudio.

Elemento	Espesor (m)	Transmitancia térmica (W/m <sup>2</sup> K)
<b>Forjado interior</b>	0.430	2.169
<b>Ventana</b>	0.016	3.450
<b>Partición</b>	0.090	0.394
<b>Fachada</b>	0.185	0.501



### Forjado interior

1. Baldosa de terrazo en color microgramo de dimensiones 40x40 cm
2. Arena y mortero de agarre M-4 de 40 mm de espesor
3. Forjado reticular de 350 mm de canto (30+5)
4. Aislamiento mediante lana de roca de 40 mm de espesor
5. Falso techo acústico absorbente de cartón yeso, suspendido de subestructura auxiliar

### Ventana

8. Carpintería de aluminio anodizado de hojas correderas con acristalamiento doble de vidrio CLIMALIT 4/6/6 mm
9. Lamas verticales orientables de aluminio extrusionado de 150mm de ancho

### Partición

6. Panel de madera cemento tipo Hydropanel (9+70+9/40), reforzado con estructura metálica interior de acero galvanizado
7. Aislamiento mediante lana de roca de 7 cm de espesor

### Fachada

10. Panel de cemento tipo Hydropanel, reforzado de 9 mm de espesor
11. Estructura autoportante de montantes y travesaños de chapa de acero galvanizado de dimensiones 55/400 mm
12. Aislamiento de poliuretano proyectado de 40 mm de espesor
13. Enfoscado maestreado de mortero hidrófugo M-4 de 10 mm de espesor
14. Cámara de aire ventilada
15. Fábrica de ladrillo perforado, con juntas cada 1500 mm
16. Enfoscado maestreado de mortero hidrófugo M-4 de 10 mm de espesor
17. Omega de acero galvanizado de dimensiones 40/40 mm para fijación de panel
18. Paneles de madera cemento tipo BLUCLAD o equivalente, reforzado con fibras, con tratamiento superficial a base de veladura de silicato Marca "KEIM" o equivalente

**Fig. 84.** Caso de estudio. Sección constructiva del aula seleccionada para la evaluación de las soluciones alternativas basadas en panel arcilla-PCM. Fuente: Información facilitada por APAE (Agencia Pública Andaluza de Educación). Editado.

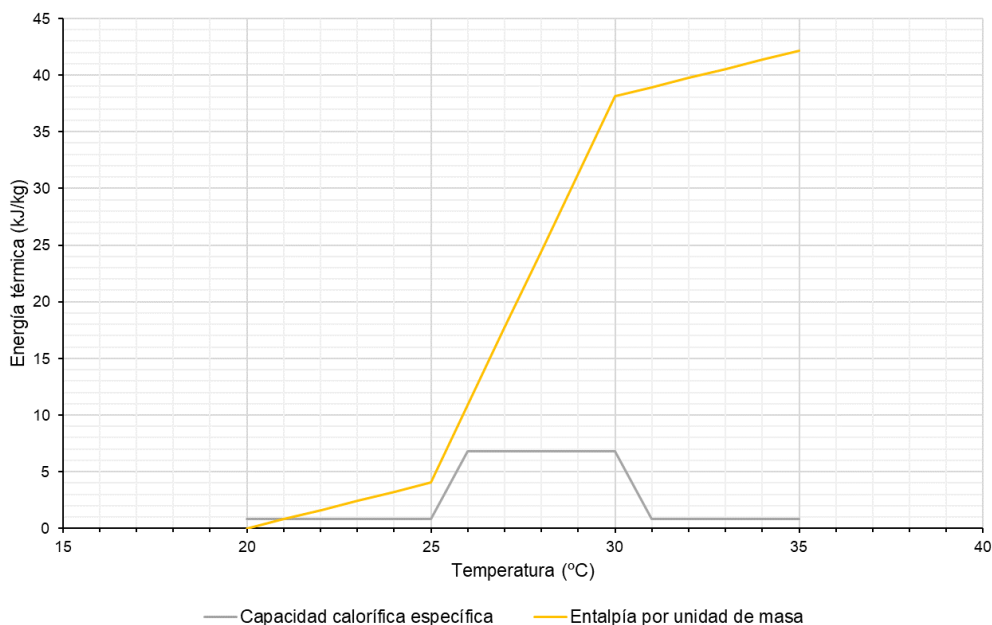
### 6.2.2. Escenarios basados en panel arcilla-PCM

La caracterización del panel arcilla-PCM, que será implementado en los escenarios con las soluciones alternativas propuestas para el caso de estudio, fue desarrollada en el capítulo anterior, según los métodos y cálculos que en él se detallan. Dicha caracterización se llevó a cabo tomando como referencia los parámetros de caracterización de materiales de almacenamiento de energía térmica referenciados en la literatura consultada [106,109]. La muestra del panel arcilla-PCM compuesto con mejores prestaciones térmicas fue el panel arcilla+20%PCM con un 20% de PCM en masa. Las propiedades termo-físicas de dicho panel se recogen en la **Tabla 30**. La distribución de la entalpía durante el proceso de fusión del panel-arcilla PCM se ilustra en la **Fig. 85**.

**Tabla 30.** Caracterización termo-física del panel arcilla-PCM

Propiedades	Caracterización
<b>Espesor (m)</b>	0.02
<b>Densidad (<math>\rho</math>)</b>	835.8 kg/m <sup>3</sup>
<b>Capacidad de almacenamiento térmico por unidad de masa (Q)</b>	42.168 kJ/kg
<b>Capacidad de almacenamiento térmico del panel (Q<sub>panel</sub>)*</b>	704.87 kJ/m <sup>2</sup>
<b>Temperatura de fusión (T)</b>	28 °C (rango entre 27 y 29°C)

\*Valores calculados teniendo en cuenta la capacidad de almacenamiento térmico sensible y latente de la solución constructiva para una diferencia de temperatura de 15°C, entre 20 y 35°C



**Fig. 85.** Distribución de la entalpía durante el proceso de fusión del panel arcilla-PCM.

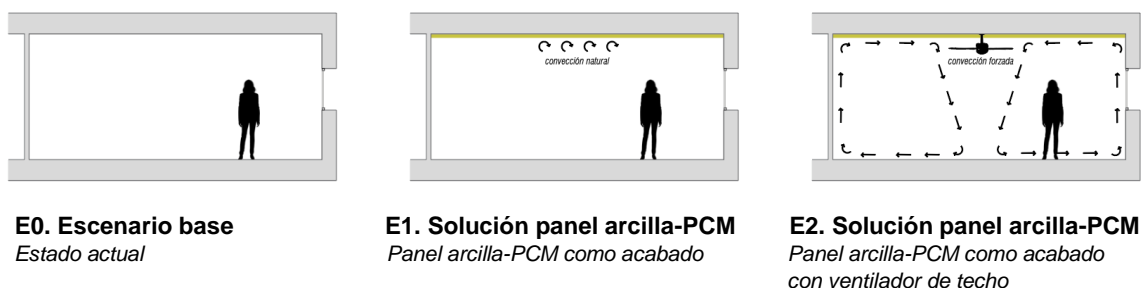
Las soluciones basadas en el panel arcilla-PCM propuestas para el caso de estudio se analizan mediante dos escenarios (E1 y E2) que se evalúan según dos variantes, tal y

como se recoge en la **Tabla 31**. El escenario base (E0) lo constituye el caso de estudio en su estado actual, que carece de cualquier solución a base de PCM. Este escenario ya ha sido caracterizado en detalle en el subapartado 6.2.1, y se ilustra, junto al resto de escenarios, en la **Fig. 86**. Por su parte, para los escenarios con las propuestas alternativas basadas en tecnologías de TES se ha seguido, en ambos casos, una misma solución de aplicación convencional. Ésta ha consistido en la disposición del panel arcilla-PCM como capa de acabado en contacto directo con el forjado interior existente. Se han configurado dos escenarios para las propuestas alternativas basadas en tecnologías de TES (ver **Fig. 86**): un escenario con una primera propuesta de implementación del panel arcilla-PCM (E1), donde la transferencia de calor entre el panel y aire se caracteriza por la convección natural; y una segunda propuesta de implementación del panel arcilla-PCM (E2), donde la transferencia de calor se caracteriza por la convección forzada por un ventilador de techo.

Todos los escenarios se evalúan, a su vez, según la variante 1 (sin ventilación nocturna) y la variante 2 (con ventilación nocturna), las cuales se detallan en el subapartado 6.3. Para ambas variantes, los índices de renovación del aire asociados a la infiltración y la ventilación se establecen en base a los valores teóricos recogidos en los manuales del IDEA para la evaluación y certificación energética de edificios existentes según la normativa vigente del CTE [110,111].

**Tabla 31.** Resumen de los escenarios alternativos para la evaluación

Escenario	Variante 1 (sin ventilación nocturna)	Variante 2 (con ventilación nocturna)
<b>E1. Solución panel arcilla-PCM (convección natural – sin ventilador)</b>	E1v1	E1v2
<b>E2. Solución panel arcilla-PCM (convección forzada – con ventilador)</b>	E2v1	E2v2



**Fig. 86.** Ilustración de los escenarios para la evaluación



### 6.3. Modelado numérico de la simulación

El modelado numérico para la simulación de los escenarios se ha llevado a cabo mediante el software de simulación dinámica de sistemas energéticos TRNSYS v18. Se trata de un simulador de diagrama de flujo con una interfaz gráfica que facilita la descomposición de sistemas complejos en componentes (*types*) de modelo vinculados entre sí [106].

El modelado numérico del caso de estudio se subdivide, a su vez, en cinco fases, ilustradas en la **Fig. 80** del apartado 6.1: el modelado del caso de estudio (geometría, caracterización constructiva, horarios de ocupación, índices de infiltración y ventilación, y las ganancias/pérdidas internas), la calibración y validación del modelo, la capa de panel arcilla-PCM, los modos de operación y los indicadores de comportamiento del modelo numérico.

#### 6.3.1. Modelado del caso de estudio

El caso de estudio, esto es, el aula, se ha modelado como zona única con el componente *Type56* que incluye el software TRNSYS. El modelado se ha llevado a cabo según la caracterización geométrica y constructiva detallada en el subapartado 6.2.1, a través de la herramienta TRNBuild, la cual posibilita la introducción pormenorizada de las condiciones de la zona permitiendo generar una simulación paramétrica del comportamiento real de la misma. Así, se ha podido definir: la geometría del caso de estudio (dimensiones, orientación y localización), la caracterización constructiva del caso de estudio (materiales y elementos constructivos a base de dichos materiales, incluyendo paredes, suelos, techos, cubiertas y ventanas), los horarios de ocupación, los índices de infiltración y ventilación, y las ganancias/pérdidas internas.

Los datos climáticos utilizados en el modelo del edificio corresponden a los datos meteorológicos de la ciudad de Sevilla obtenidos de AEMET para la Estación de Tablada (WMO 083900) [112]. Dichos datos son implementados en el modelo utilizando el componente *Type15-3* que actúa como lector de datos climáticos. La simulación se realiza en el mes de junio del año 2020.

Los horarios de ocupación se han definido de acuerdo con el uso docente de la zona, esto es, de 08:00 a 15:00 horas, de lunes a viernes; y se ilustran en la **Fig. 87**. Las ganancias internas debidas a la ocupación y la iluminación se han configurado desde la librería del software TRNSYS, seleccionando aquellas referidas a espacios de aula (*classroom*), que se definen en base a la normativa UNE-EN ISO 7730:2006 [113,114]. Se introducen sólo ganancias de ocupación y de iluminación, pues el aula no presenta dispositivos adicionales que incluir en la simulación. El índice de flujo de calor específico de los ocupantes ( $\Phi_{int,occ}$ ) se ha caracterizado como  $23.3 \text{ W/m}^2$ , siendo ponderado según los horarios de ocupación. El índice de flujo de calor específico de la iluminación ( $\Phi_{int,igt}$ ) se ha caracterizado considerando que las luminarias se encenderán cuando la radiación solar que entra por la ventana sea inferior a un mínimo. Por ello, se asume como criterio, teniendo en cuenta la orientación y localización del aula, la aplicación de un coeficiente de minoración de 0.5 respecto al valor por ocupación (ver **Fig. 87**), asumiendo que existirán días en los que no se precise el funcionamiento del sistema de iluminación del aula en ningún momento o en parte de ellos. Las cargas se introducen en todo caso

como valores unitarios ( $\text{kJ}/\text{hm}^2$ ) con el fin de parametrizar la ratio y que la carga superficial se calcule y aplique proporcionalmente a cada posible escenario.

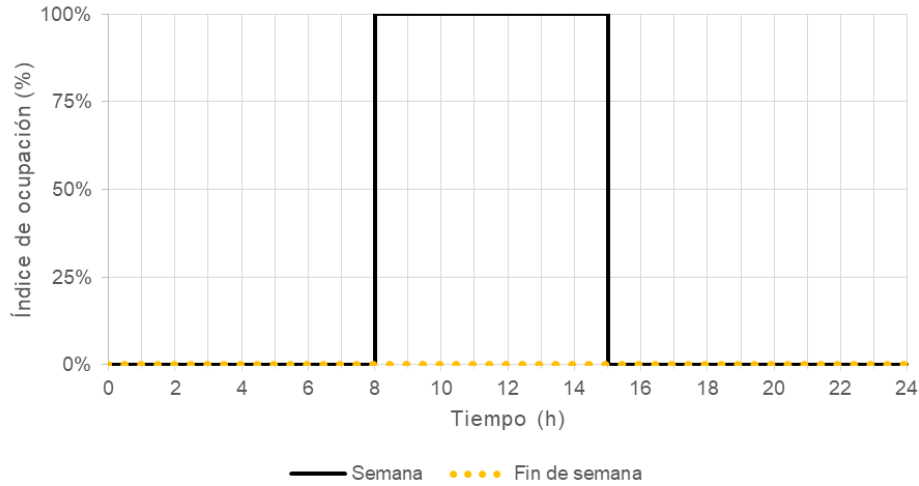


Fig. 87. Horarios de ocupación del modelo de simulación numérica

Los índices de renovación del aire asociados a la infiltración y la ventilación se establecen en base a los valores teóricos recogidos en los manuales del IDEA para la evaluación y certificación energética de edificios existentes según la normativa vigente del CTE [110,111]. Las pérdidas por infiltración se definen así con un índice de renovación del aire (ACH) de  $0.63 \text{ h}^{-1}$ . Por su parte, para la ventilación nocturna durante el período estival, la normativa indica que se puede estimar una tasa de renovación del aire de  $4 \text{ h}^{-1}$  [110,111]. En el caso de estudio, para la variante 1, en ausencia de ventilación, se establece un índice de renovaciones/hora de  $1 \text{ h}^{-1}$  como valor estimado por defecto en las referencias [101]; mientras que, para la variante 2, en el subapartado 6.4.1, se calculan diversas alternativas para los índices de renovación del aire en base al área de apertura de ventanas (ver **Tabla 34**).

El flujo de aire de estas renovaciones durante la ventilación nocturna (NV) para la regeneración del panel arcilla-PCM se ha calculado a partir del método de cálculo definido en la norma UNE-EN 15242:2007 [115], siguiendo la ecuación (9), donde el flujo de aire se calcula según el área de ventana abierta y la velocidad media del aire a través de la misma [106,116].

$$Q_v = 3.6 \cdot 500 \cdot A_{ow} \cdot V^{0.5} \quad (9)$$

donde

$Q_v$ : el flujo del aire ( $\text{m}^3/\text{h}$ )

$A_{ow}$ : el área de ventana abierta ( $\text{m}^2$ )

$V$ : la velocidad media del aire ( $\text{m}/\text{s}$ )

Las pérdidas por los puentes térmicos de la envolvente se han caracterizado con una carga superficial de  $0.1 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ , siguiendo el Anexo G de la UNE-EN ISO 13789:2017 [117]. La capacidad calorífica interna del modelo del edificio se fija en  $1472.06 \text{ kJ}/\text{K}$ .



Este valor resulta de la capacitancia térmica del volumen de aire interior de 368.06 kJ/K, y una capacidad calorífica efectiva del mobiliario y de las paredes internas de 1104 kJ/K, el cual se obtiene multiplicando la capacitancia térmica del volumen de aire interior por un coeficiente de mayoración de 3. Según las publicaciones consultadas [106], la capacidad calorífica interna total se puede calcular mediante la multiplicación de la capacitancia térmica del volumen de aire interno del modelo por un valor constante, que puede oscilar, según el uso de la zona, entre 3 y 8 [118]. Asimismo, según el caso, los valores recomendados por el manual de uso del software TRNSYS oscilan entre 3 y 5 [119].

### 6.3.2. Calibración y validación del modelo

La calibración y validación del modelo del caso de estudio se lleva a cabo según el manual ASHRAE Guideline 14-2014 [120], a partir de los datos obtenidos con las mediciones realizadas en el interior del aula en el período simulado (junio de 2020). Este archivo de datos medidos en el aula se introduce mediante el componente *Type9-a* que actúa como lector de datos en formato libre. Los valores obtenidos tanto por la medición como por la simulación numérica del modelo se extraen para su análisis comparativo mediante el componente *Type65*, que imprime las variables vinculadas como *inputs* en un archivo externo de lectura (ver **Fig. 88**). Los índices de incertidumbre calculados a partir de dichos valores para la validación del modelo se recogen en la **Tabla 32**.

**Tabla 32.** Índices de incertidumbre para la validación del modelo del caso de estudio en base al manual ASHRAE Guideline 14-2014.

Índices de incertidumbre	Modelo del caso de estudio	Criterios ASHRAE 14-2014
<b>NMBE</b>	-1%	±10%
<b>CV-RMSE</b>	3%	< 30%
<b>R<sup>2</sup></b>	0.99	> 0.75

Los resultados muestran una desviación entre los valores obtenidos con las mediciones y con la simulación numérica por hora inferior al 5% en el NMBE e inferior al 15% en el CV-RMSE, así como un valor de R<sup>2</sup> superior al 0.75. Por tanto, la simulación numérica del caso de estudio en su estado actual cumple los criterios del manual ASHRAE Guideline 14-2014 [120], alcanzando unos resultados de calibración de -1% para el NMBE, de 3% para el CV-RMSE y de 0.99 para el R<sup>2</sup>.

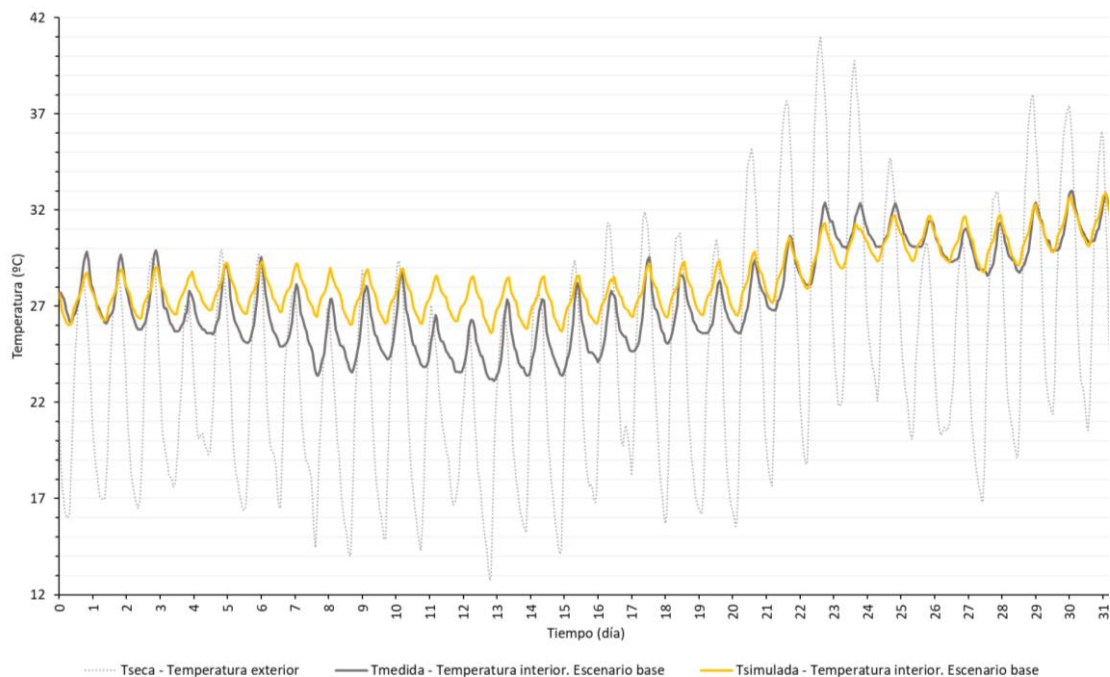


Fig. 88. Análisis comparativo de valores obtenidos mediante la medición y la simulación numérica durante el mes de junio

### 6.3.3. Capa de panel arcilla-PCM

El modelado de la capa de panel arcilla-PCM se lleva a cabo siguiendo el proceso detallado en [106], donde la caracterización del elemento constructivo se realiza mediante el componente *Type399*, que permite la simulación de elementos del modelo numérico mejorados con PCM [121], y que fue desarrollado por A. Dentel y W. Stephan [122]. En las referencias mencionadas [106,122], se describe detalladamente la estructura del modelo matemático, basado en el método Crank-Nicolson, implementado para la caracterización del comportamiento simulado de la capa de PCM.

Las propiedades termo-físicas del panel arcilla-PCM, recogidas previamente en el subapartado 6.2.2 (ver **Tabla 30**), se incorporan al modelo mediante el componente *Type399*, el cual se vincula con el componente *Type56* del modelo del aula para su interacción, y se integra en el mismo a través de la creación de un elemento constructivo base en contacto directo con el forjado interior. Dado que no es posible modelar una capa con PCM dentro de la zona siguiendo el mismo proceso de modelado de elementos constructivos que se detalló previamente en el subapartado 6.2.1, el objetivo consiste en simular el comportamiento integrado de esta capa en el forjado del modelo. Para ello, se llevan a cabo diversas operaciones para importar, aplicar ecuaciones de conversión y vincular, a modo de *inputs* y *outputs*, las variables de ambos componentes, tal y como se detalla en las referencias consultadas [106,122,123].

Para el comportamiento integrado de esta capa en los escenarios con las soluciones alternativas, el coeficiente de transferencia de calor por convección ( $h_c$ ) entre el panel arcilla-PCM y el aire tiene un papel clave. Por un lado, para los escenarios sin ventilador, esto es, para el escenario base (E0) y el escenario 1 propuesto (E1), donde la transferencia de calor se caracteriza por la convección natural, se asume el valor definido por el manual de uso del software TRNSYS para espacios interiores, esto es,

11 kJ/hm<sup>2</sup>K (3.055 W/m<sup>2</sup>K) [119]. No obstante, este coeficiente sólo es aplicable a la variante 1 (v1 – sin ventilación nocturna) y al período diurno (08:00-24:00) de la variante 2 (v2 – con ventilación nocturna), pues, durante la noche, en estos escenarios (E0, E1), la velocidad del aire aumentará como consecuencia de la ventilación nocturna cruzada.

Para el período nocturno (00:00-08:00) de la variante 2 (v2), como valor orientativo de las referencias consultadas [124–126], se asume una velocidad del aire durante la ventilación nocturna en dichos escenarios de 2 m/s. El coeficiente  $h_c$ , el cual se ve mejorado por el flujo de aire forzado de dicha ventilación, se puede calcular a partir de la ecuación **(10)**, la cual lo presenta como función de la velocidad del viento [106]. Por tanto, para una velocidad del aire de 2 m/s, el  $h_c$  entre el panel arcilla-PCM y el aire resulta en 8.8 W/m<sup>2</sup>K (31.68 kJ/hm<sup>2</sup>K  $\approx$  32 kJ/hm<sup>2</sup>K).

$$h_{fc} = a + bV = 2.8 + 3V \quad \mathbf{(10)}$$

donde

$h_{fc}$ : el coeficiente de transferencia de calor por convección forzada (W/m<sup>2</sup>K)

V: la velocidad del viento (m/s)

Por otro lado, para el escenario con ventilador de techo, es decir, para el escenario 2 propuesto (E2), el valor del coeficiente  $h_c$  debido al flujo de aire forzado por el ventilador sobre la superficie del panel arcilla-PCM se calcula nuevamente según la ecuación **(10)**. Así, para una velocidad del aire de 5 m/s, el coeficiente  $h_c$  entre el panel arcilla-PCM y el aire resulta en 17.8 W/m<sup>2</sup>K (64,08 kJ/hm<sup>2</sup>K  $\approx$  64 kJ/hm<sup>2</sup>K). Este valor se ajusta de manera coherente a los valores representativos obtenidos para escenarios similares, según se referencia en Lizana et al. [106]. Yanbing et al. [127] obtuvo un valor oscilante entre 12 y 19 W/m<sup>2</sup>K para el coeficiente  $h_c$  entre el panel arcilla-PCM y el aire con ventilación forzada. Hed y Bellander [128] demostraron que, en comparación con una superficie lisa, el coeficiente  $h_c$  entre el panel arcilla-PCM y el aire aumenta considerablemente cuando se trata de una superficie áspera, con un valor oscilante entre 16 y 30 W/m<sup>2</sup>K, para una velocidad del aire de 4 m/s.

La variación en la velocidad del aire interior como consecuencia de la ventilación nocturna y el funcionamiento del ventilador de techo afectaría al coeficiente de transferencia de calor por convección ( $h_c$ ) de todos los paramentos del aula, incluso a la temperatura operativa dentro del aula. No obstante, para el modelado numérico de la simulación, se decide considerar sólo las variaciones en el coeficiente  $h_c$  sobre la superficie del panel arcilla-PCM. Esta simplificación, que persigue facilitar la primera aproximación al modelado numérico de escenarios de tal complejidad, posibilita, no obstante, un estudio más directo de los beneficios provistos exclusivamente por el panel arcilla-PCM dentro de unas condiciones de contorno concretas. En cualquier caso, de cara a la estimación de los resultados de la simulación, cabe aclarar que la inclusión de los efectos de la ventilación sobre el resto de superficies del escenario (incluidos los ocupantes) supondría una mejora de las temperaturas operativas aceptables por el modelo de confort adaptativo y, por ende, disminuiría los porcentajes de disconfort, asemejándose más a el comportamiento de la solución en un caso real. Esta relación entre la ventilación y el confort térmico se describe con mayor detenimiento en el subapartado 6.3.5, donde se presenta el modelo de confort térmico adaptativo como indicador para la evaluación de las soluciones propuestas.

Por último, la verificación del modelo de panel arcilla-PCM, integrado en la simulación según el método detallado en este subapartado, se lleva a cabo mediante la verificación de los valores de entalpía en el modelo simulado, respecto a los de su caracterización teórica, calculados en el capítulo anterior. Esto permite confirmar que la simulación numérica del panel arcilla-PCM presenta un comportamiento térmico conforme a su caracterización material y que, por ende, ha sido integrado correctamente en el modelo del caso de estudio. Por otro lado, la validación de los escenarios basados en el panel arcilla-PCM se lleva a cabo a partir de la validación de los componentes integrados para simular el comportamiento del panel, los cuales ya han sido validados experimentalmente con anterioridad en las referencias mencionadas [106,122].

#### 6.3.4. Modos de operación

Para los escenarios con las propuestas alternativas basadas en tecnologías de TES, en base a las referencias [106], se han implementado dos modos de operación, que se detallan a continuación, y se ilustran en la **Fig. 89**:

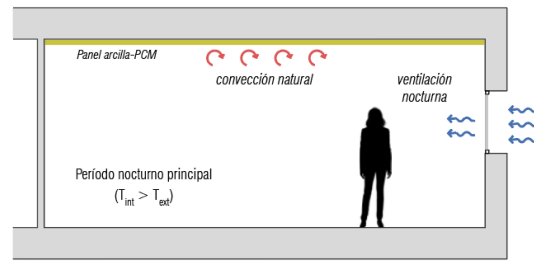
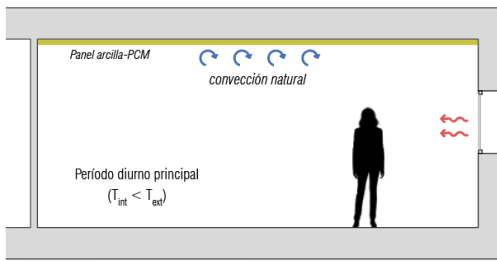
- Modo de operación 1 durante el día – con PCM en estado sólido: El panel arcilla-PCM absorbe las ganancias de calor durante el día, fundiéndose. La propuesta de implementación del panel arcilla-PCM en el escenario 1 (E1) se caracteriza por la convección natural, y la propuesta de implementación del panel en el escenario 2 (E2), por la convección forzada inducida por un ventilador, lo cual aumenta el coeficiente de transferencia de calor entre el panel y el aire interior del aula.
- Modo de operación 2 durante la noche – con PCM fundido: El panel arcilla-PCM libera el calor almacenado mediante el free-cooling nocturno, solidificándose. La propuesta de implementación del panel arcilla-PCM en el escenario 1 (E1) se caracteriza por la ventilación natural mediante la apertura de ventanas, y en la propuesta de implementación del panel del escenario 2 (E2) un ventilador fuerza el flujo de aire frío exterior contra la superficie del panel.

Los dos escenarios de las soluciones alternativas de panel arcilla-PCM se evalúan según dos variantes: la variante 1 (sin ventilación nocturna) y la variante 2 (con ventilación nocturna), las cuales se han detallado previamente en el apartado 6.3. Ambas variantes se evalúan según los dos modos de operación (1 y 2). El *time step* de la simulación se fija en 90 segundos.

**E1. Solución panel arcilla-PCM (convección natural – sin ventilador)**

Modo 1 – Panel cargando ( $T_{int} < T_{ext}$ ;  $PCM_{solidificado}$ )  
 $PCM_{fundido}$ )

Modo 2 – Panel descargando ( $T_{int} > T_{ext}$ ;



**E2. Solución panel arcilla-PCM (convección forzada – con ventilador)**

Modo 1 – Panel cargando ( $T_{int} < T_{ext}$ ;  $PCM_{solidificado}$ )  
 $PCM_{fundido}$ )

Modo 2 – Panel descargando ( $T_{int} > T_{ext}$ ;

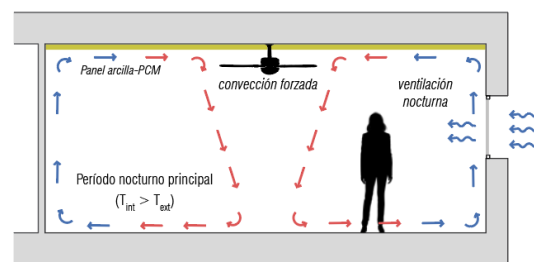
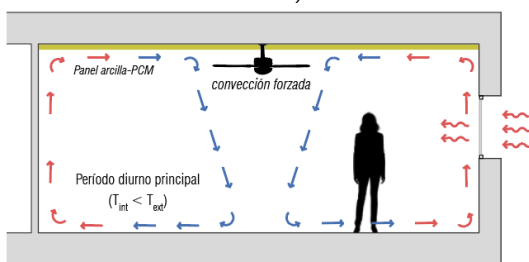


Fig. 89. Modos de operación de las soluciones alternativas de panel arcilla-PCM propuestas en cada escenario (E1 y E2), basados en [106].

6.3.5. Indicadores del comportamiento del modelo numérico

Los indicadores de comportamiento se definen para la evaluación del comportamiento energético de los escenarios con las propuestas alternativas basadas en tecnologías de TES en comparación con el escenario base del caso de estudio. Para este caso, se implementan los indicadores de evaluación en base al período de desconfort desarrollados en [106].

Así, los escenarios de las soluciones propuestas se han evaluado durante el período estival previamente definido, concretamente durante el mes de junio, en base a los siguientes indicadores [106]:

- (1) Porcentaje de horas de desconfort severo ( $DH$ , %), con un rango de desconfort basado en un límite superior de  $T_{op} > 29^{\circ}C$  [106].
- (2) Porcentaje de horas de desconfort ( $DH_{acm}$ , %), considerando el rango de desconfort del modelo de confort térmico adaptativo establecido en la normativa UNE-EN 16798-1:2020 [129].

Este modelo para la evaluación del confort térmico en espacios interiores surge de la estandarización de la teoría del confort térmico adaptativo, incorporada en diversas normas y estándares, entre los que se encuentra la normativa UNE-EN 15251:2008, recientemente actualizada en la 16798-1:2020 [129].

Frente al sujeto pasivo de los modelos estáticos, la teoría adaptativa persigue estudiar la aceptabilidad real de un ambiente térmico por una persona en base a su experiencia térmica, vinculada al proceso de adaptación de sus expectativas térmicas al mismo.

Dicha adaptación, entendida como proceso de aminoración de la reacción fisiológica de la persona como consecuencia de su exposición reiterada a unas condiciones térmicas del ambiente, dependerá, pues, del ambiente térmico y de la exposición e interacción de la persona con el mismo [130,131]. En este proceso de experiencia y adaptación térmicas se dan lugar flujos complejos de interpretación que han sido objeto de cuantiosos estudios para la fundamentación de modelos de confort térmico desde un punto de vista adaptativo [130,132], como el que aquí se emplea.

Entre las investigaciones que dieron origen y fundamento a esta teoría, se encuentra el denominado proyecto ASHRAE RP-884, de la mano de De Dear y Brager [132], para la recopilación y gestión de grandes bases de datos que, con su estudio, darían lugar a métodos para el cálculo de diversos índices de confort, relacionando factores como la temperatura operativa interior, la velocidad del aire interior, la vestimenta o la temperatura media exterior [130,131]. Es en base a estos estudios que se puede entender lo referido en el subapartado 6.3.3, esto es: (a) la relación entre la ventilación del aula y el confort térmico, y, del mismo modo, a la inversa, (b) la minoración de los porcentajes de confort que resultará de no incluir en la simulación la variación del coeficiente de transferencia de calor de todas las superficies del aula (incluida la piel de los ocupantes) resultante de la variación de dicha ventilación. Según la teoría adaptativa, la temperatura operativa interior confortable se encuentra supeditada a la experiencia o sensación térmica de la persona. En períodos estivales, dicha experiencia se verá mejorada (es decir, hará confortable la temperatura operativa interior) con la mejora de la transferencia de calor entre el cuerpo y el ambiente mediante el aumento de la velocidad del aire interior, a través, por ejemplo, de un ventilador de techo. Al no incluir estos factores de mejora con la instalación del ventilador en la simulación, los períodos de confort resultantes serán más reducidos de los que se obtendrían en la realidad.

Recuérdese que la decisión de incluir en la simulación exclusivamente el coeficiente de transferencia de calor de la superficie del panel arcilla-PCM se toma asumiendo las reducciones en el rango de confort que ello supone, pero buscando simplificar el proceso de modelado y evaluación de los escenarios en esta investigación centrándose en los beneficios directos del panel.

Tales estudios, junto a otras propuestas de modelo adaptativo [133], se encuentran en la base de las normas y estándares antes mencionados, destacando por su impacto, junto a la UNE-EN 16798-1:2020, la norma ANSI/ASHRAE 55 y la norma UNE-EN ISO 7730:2006. Cada norma especifica la relación o combinación de factores relevantes y los criterios exigidos para la producción de un ambiente térmico confortable.

La norma UNE-EN 16798-1:2020, aplicable tanto a uso residencial como a aquellos usos que engloben actividades sedentarias [134], se debe emplear para el dimensionado de sistemas pasivos en espacios que carezcan de sistemas activos de acondicionamiento del aire, que cuenten con ventanas operables y que permitan al usuario adaptar su vestimenta a las condiciones térmicas [131]. Esta norma presenta tres tipos de categoría (I, II y III); cada una de las cuales establece un límite superior e inferior para el rango de confort, en base a un nivel de expectativa térmica más o menos exigente. La temperatura operativa interior de confort ( $T_{co}$ ) que sirve de referencia para la determinación de dicho rango se calcula a partir de la temperatura exterior media de funcionamiento ( $\theta_m$ ), según la ecuación **(11)** [129,130,135].

$$T_{co} = 0.33 \cdot \theta_{rm} + 18.8 \quad (11)$$

donde  $\theta_{rm}$  es la temperatura exterior media de funcionamiento

La temperatura exterior media de funcionamiento ( $\theta_{rm}$ ) se calcula en base a la temperatura media de los 7 días previos al día concreto, según la ecuación (12), y debe encontrarse, según la normativa, entre 10 y 30°C tanto en su límite superior como en su límite inferior [130,131].

$$\theta_{rm(ed)} = (\theta_{ed-1} + 0.8 \cdot \theta_{ed-2} + 0.6 \cdot \theta_{ed-3} + 0.5 \cdot \theta_{ed-4} + 0.4 \cdot \theta_{ed-5} + 0.3 \cdot \theta_{ed-6} + 0.2 \cdot \theta_{ed-7})/3.8 \quad (12)$$

donde

$\theta_{rm(ed)}$  : la temperatura exterior media de funcionamiento del día concreto

$\theta_{ed-n}$  : la temperatura media diaria del aire exterior durante n-días previos al día concreto

Para este caso, el modelo de confort adaptativo se ha calculado siguiendo el rango de temperaturas interiores operativas aceptables según la categoría I [130,135] para edificios con requisitos especiales, que se asocia a un nivel de expectativa alto (PPD < 6%) [130]. Este rango está determinado por una amplitud de la zona de confort de +2K (límite superior) y -3K (límite inferior), respecto a la temperatura operativa interior de confort ( $T_{co}$ ), calculada aplicando las ecuaciones (11) y (12).

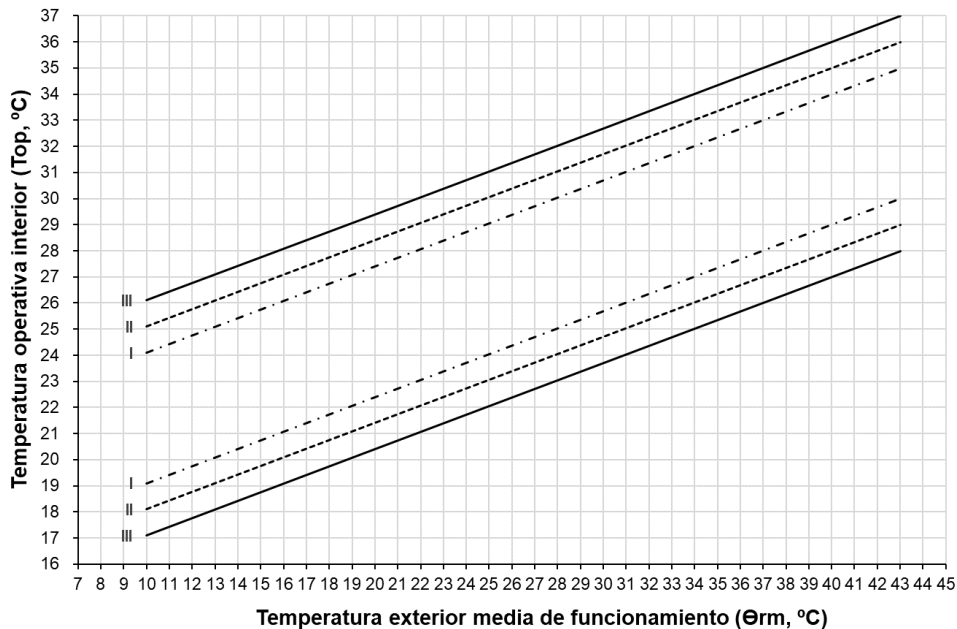


Fig. 90. Gráfica del rango de confort según el modelo de confort adaptativo, calculada, respecto a la temperatura operativa interior de confort ( $T_{co}$ ) del caso de estudio, para las tres categorías (I, II, III), según la UNE-EN 16798-1:2020.

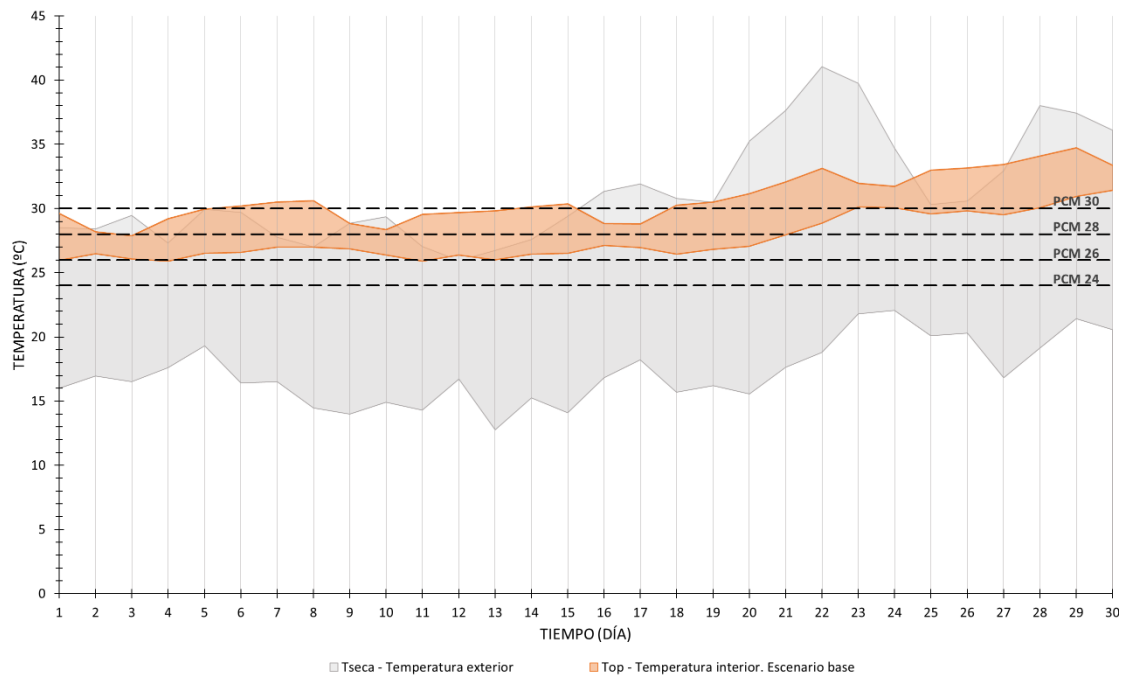
## 6.4. Resultados de la simulación y discusión

La optimización de las soluciones alternativas de panel arcilla-PCM propuestas se ha analizado siguiendo tres fases de evaluación [106]. Así, en una primera fase (6.4.1), se evalúa el comportamiento energético del escenario base, así como los parámetros determinantes en el diseño e implementación de la capa de panel arcilla-PCM. Estos parámetros son incluidos en el análisis de sensibilidad de la siguiente fase: la temperatura de fusión ( $^{\circ}\text{C}$ ), así como el área de ventana abierta ( $\text{m}^2$ ) y el índice de renovaciones/hora durante la ventilación nocturna. En esta segunda fase (6.4.2), se recogen los resultados del análisis paramétrico de los dos escenarios alternativos, discutiendo en cada caso las opciones más pertinentes para la optimización en el diseño e implementación del panel arcilla-PCM. En tercer y último lugar (6.4.3), se presenta y discute el comportamiento final de las soluciones, una vez optimizadas para cada uno de los escenarios en base a la fase anterior.

### 6.4.1. Evaluación del escenario base y parámetros para el análisis de la solución

Los resultados del Escenario base (E0) muestran un periodo de disconfort severo, basado en  $T_{\text{op}} > 29^{\circ}\text{C}$  (DH), de 57.92%, y un periodo de disconfort definido por el modelo de confort adaptativo ( $\text{DH}_{\text{acm}}$ ), de 72.50%.

Para el análisis paramétrico de las soluciones alternativas de panel arcilla-PCM, por un lado, se analizan la oscilación de la temperatura exterior y la evolución de la temperatura máxima y mínima diaria en el Escenario base (E0), durante el mes de junio (ver **Fig. 91**), con el fin de realizar una selección óptima de alternativas a la temperatura de fusión del PCM en base a las exigencias climáticas.



**Fig. 91.** Temperatura máxima y mínima diaria del Escenario base (E0) del caso de estudio durante el mes de junio, junto a la oscilación de la temperatura exterior ( $T_{\text{seca}}$ ), con las diferentes alternativas de temperatura de fusión del PCM (PCM 24, 26, 28 y 30)



En este análisis, se consideran cuatro alternativas para la temperatura de fusión del PCM, recogidas en la **Tabla 33**. Para el estudio teórico de estas alternativas, se modifica sólo la distribución de la entalpía con el fin de configurar las temperaturas de fusión estimadas, conservando las propiedades termo-físicas idénticas al Micronal® 28D.

**Tabla 33.** Alternativas de diseño de la temperatura de fusión del PCM.

Nomenclatura	Temperatura de fusión (°C)	Entalpía de fusión (kJ/kg)
<b>PCM 24</b>	24	150.00
<b>PCM 26</b>	26	150.00
<b>PCM 28</b>	28	150.00
<b>PCM 30</b>	30	150.00

Por otro lado, dada la importancia de la ventilación nocturna para la regeneración del panel arcilla-PCM durante el periodo estival, se han considerado tres alternativas en el índice de renovación del aire durante dicha ventilación, en base al área de las ventanas, sus dimensiones y su sistema de apertura (ver **Tabla 34**). Se trata de un sistema de ventana corredera, compuesto por tres ventanas y cada una, por un par de bastidores móviles. Esta configuración sólo permite pues correr y abrir uno de los bastidores en cada par. Para cada ventana, se pueden estimar dos áreas de apertura: un área de 0.75 m<sup>2</sup> (si el bastidor está parcialmente abierto) y de 1.15 m<sup>2</sup> (si el bastidor está completamente abierto). Como tercera alternativa, se estudia una combinación de apertura, considerando un bastidor completamente abierto en una de las ventanas (1.15 m<sup>2</sup>) y uno parcialmente abierto en otra (0.75 m<sup>2</sup>), resultando un área total de 1.90 m<sup>2</sup>.

El escenario base (E0) se evalúa según la configuración actual del caso de estudio y, por ende, con un índice de renovación del aire de 1 h<sup>-1</sup> (sin ventilación nocturna). Los escenarios alternativos se han evaluado inicialmente (Análisis de sensibilidad 1) partiendo de la alternativa con el valor intermedio, esto es, de un área de apertura de ventana de 1.15 m<sup>2</sup>, con un índice de renovación del aire de 3.0 h<sup>-1</sup> [110,111]. Las alternativas restantes para el índice de renovación del aire de la **Tabla 34** se consideran en el Análisis de sensibilidad 2, del que se deducirá la alternativa óptima. Finalmente, en el Análisis de sensibilidad 3 se evalúan los dos escenarios alternativos de panel arcilla-PCM según la variante 1 (sin ventilación nocturna), con un índice de renovación del aire de 1 h<sup>-1</sup>, y la variante 2 (con ventilación nocturna), con el índice de renovación óptimo deducido del Análisis de sensibilidad 2. Por su parte, las pérdidas por infiltración se definen en todo momento con un índice de renovación del aire (ACH) de 0.63 h<sup>-1</sup>.

**Tabla 34.** Alternativas del índice de renovación del aire durante la ventilación nocturna según el área de apertura de ventanas.

Nomenclatura	Apertura de ventana (m <sup>2</sup> )	Ventilación nocturna media (h <sup>-1</sup> )
<b>A<sub>ow</sub> 0.75</b>	0.75	2.0
<b>A<sub>ow</sub> 1.15</b>	1.15	3.0
<b>A<sub>ow</sub> 1.90</b>	1.90	5.0

#### 6.4.2. Análisis paramétrico para la optimización de la solución

##### 6.4.2.1. Análisis de sensibilidad 1: Temperatura de fusión y Análisis de sensibilidad 2: Índice de renovación del aire

El análisis paramétrico de las dos soluciones alternativas de panel arcilla-PCM propuestas (E1 y E2) consta de un primer análisis de sensibilidad en la variante 2 (con ventilación nocturna), considerando las alternativas de temperatura de fusión del PCM ( $^{\circ}\text{C}$ ) (ver **Tabla 33**), así como los índices de renovación del aire iniciales, detallados en el subapartado anterior. La línea naranja representa la alternativa seleccionada en el análisis para cada escenario.

La temperatura de fusión del PCM ( $^{\circ}\text{C}$ ) es un parámetro clave para la eficiencia de la solución. Una selección errónea de la temperatura de fusión imposibilitaría el almacenamiento de calor latente del panel arcilla-PCM, pues supondría que el PCM se mantuviese en estado sólido o fundido la mayor parte del tiempo, en base a la temperatura interior en el aula. De no ser posibles estos procesos de almacenamiento de calor latente, la estrategia pasiva para el acondicionamiento térmico del aula no estaría funcionando, por lo que los resultados de los porcentajes de disconfort para las soluciones propuestas no mostrarían diferencias considerables respecto al escenario base.

El análisis de sensibilidad 1 muestra que, para la Solución panel arcilla-PCM sin ventilador (E1) y la Solución panel arcilla-PCM con ventilador (E2), la temperatura de fusión más apropiada es de  $26^{\circ}\text{C}$  y de  $28^{\circ}\text{C}$ , respectivamente (ver Análisis de sensibilidad 1 en **Fig. 92**). Para la temperatura de fusión de  $26^{\circ}\text{C}$ , la Solución panel arcilla-PCM sin ventilador – variante 2 (con ventilación nocturna) en el análisis de sensibilidad 1 muestra un periodo de disconfort severo, basado en  $T_{\text{op}} > 29^{\circ}\text{C}$  (DH), de 12.50%, y un periodo de disconfort definido por el modelo de confort adaptativo ( $\text{DH}_{\text{acm}}$ ), de 5.42%. Por su parte, para la temperatura de fusión de  $28^{\circ}\text{C}$ , la Solución panel arcilla-PCM con ventilador – variante 2 (con ventilación nocturna) presenta un periodo de disconfort severo, basado en  $T_{\text{op}} > 29^{\circ}\text{C}$  (DH), de 5.83%, y un periodo de disconfort definido por el modelo de confort adaptativo ( $\text{DH}_{\text{acm}}$ ), de 1.67%.

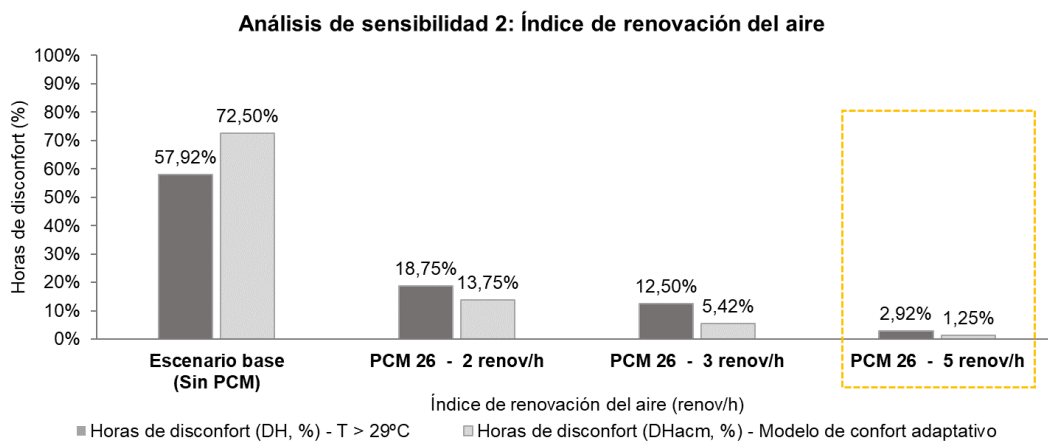
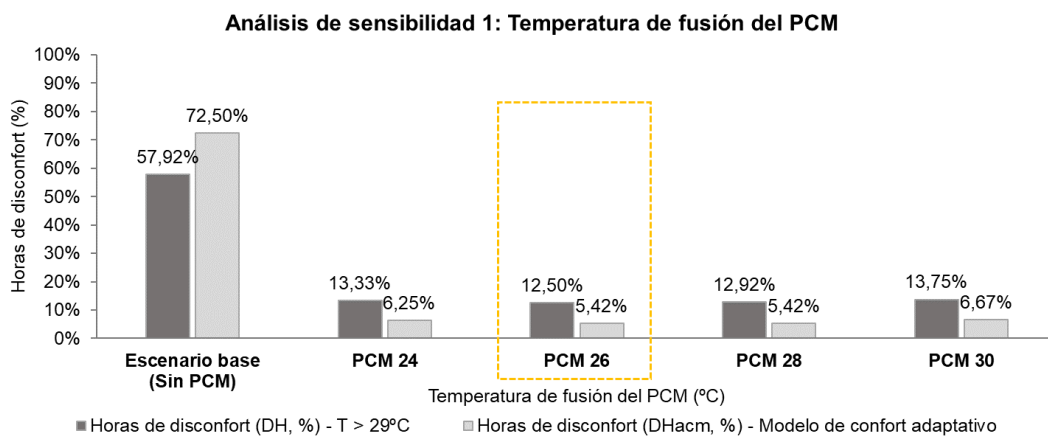
Seguidamente, aplicando la temperatura de fusión seleccionada en el análisis 1, se realiza un segundo análisis de sensibilidad en la variante 2 (con ventilación nocturna), considerando las alternativas de índice de renovación del aire durante la ventilación nocturna ( $\text{h}^{-1}$ ) (ver **Tabla 34**), definidas en el subapartado anterior. La línea naranja representa la alternativa seleccionada en el análisis para cada escenario.

Además de las ganancias internas y las condiciones climáticas, la temperatura de fusión óptima también depende de las temperaturas interiores más bajas que la ventilación nocturna puede proporcionar [106]. Un índice de renovación del aire óptimo durante la ventilación nocturna permitiría la liberación eficiente durante la noche del calor absorbido por el panel arcilla-PCM durante el período diurno, reduciendo los picos en la temperatura operativa en el interior del aula, permitiendo completar el ciclo de regeneración del panel arcilla-PCM (carga/descarga) y preparándolo para un nuevo proceso de almacenamiento térmico durante el siguiente período diurno.

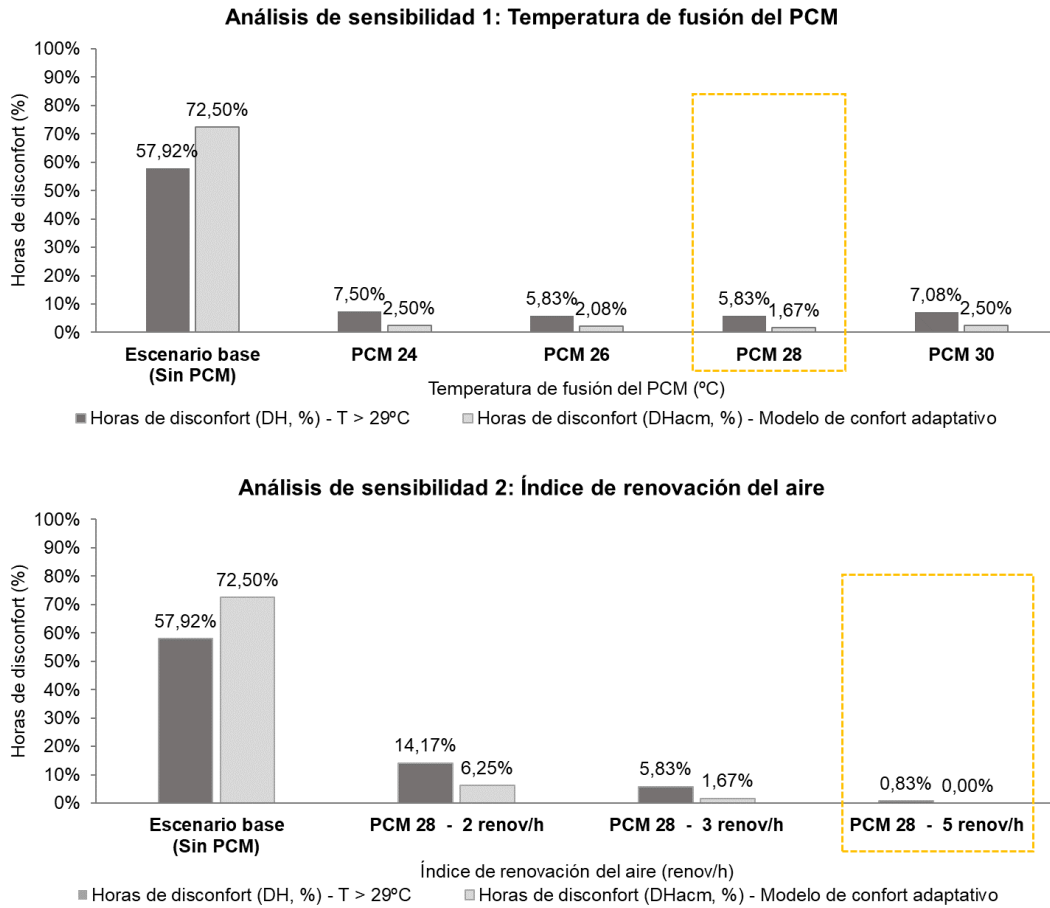
El análisis de sensibilidad 2 muestra que, tanto para la Solución panel arcilla-PCM sin ventilador (E1) como para la Solución panel arcilla-PCM con ventilador (E2), en sus respectivas temperaturas de fusión óptimas, el índice de renovación del aire más

apropiado es de  $5 \text{ h}^{-1}$  (ver Análisis de sensibilidad 2 en **Fig. 92**), correspondiente a un área de apertura de ventana de  $1.90 \text{ m}^2$ . Para un índice de renovación del aire de  $5 \text{ h}^{-1}$ , los resultados de la Solución panel arcilla-PCM sin ventilador muestran un periodo de disconfort severo, basado en  $T_{op} > 29^\circ\text{C}$  (DH), de 2.92%, y un periodo de disconfort definido por el modelo de confort adaptativo (DH<sub>acm</sub>), de 1.25%. Por su parte, la Solución panel arcilla-PCM con ventilador presenta un periodo de disconfort severo, basado en  $T_{op} > 29^\circ\text{C}$  (DH), de 0.83%, y un periodo de disconfort definido por el modelo de confort adaptativo (DH<sub>acm</sub>), de 0.00%.

**E1. Solución panel arcilla-PCM (convección natural – sin ventilador) – Variante 2 (con ventilación nocturna)**



**E2. Solución panel arcilla-PCM (convección forzada – con ventilador) – Variante 2 (con ventilación nocturna)**



**Fig. 92.** Análisis paramétrico de ambas soluciones alternativas de panel arcilla-PCM (E1 y E2) para la variante 2 (con ventilación nocturna), mediante el análisis de sensibilidad de la temperatura de fusión del PCM y del índice de renovación del aire.

#### 6.4.2.2. Análisis de sensibilidad 3: Sin ventilación nocturna o con ventilación nocturna

Por último, se procede a realizar un tercer análisis de sensibilidad, considerando para cada Solución panel arcilla-PCM (E1 y E2) las dos variantes 1 (sin ventilación nocturna) y 2 (con ventilación nocturna), definidas en el subapartado 6.3.1. Este análisis (ver **Fig. 93**) se lleva a cabo para la temperatura de fusión del PCM y el índice de renovación del aire durante la ventilación nocturna con mejores resultados de los análisis de sensibilidad 1 y 2. La línea naranja representa la alternativa seleccionada en el análisis para cada escenario.

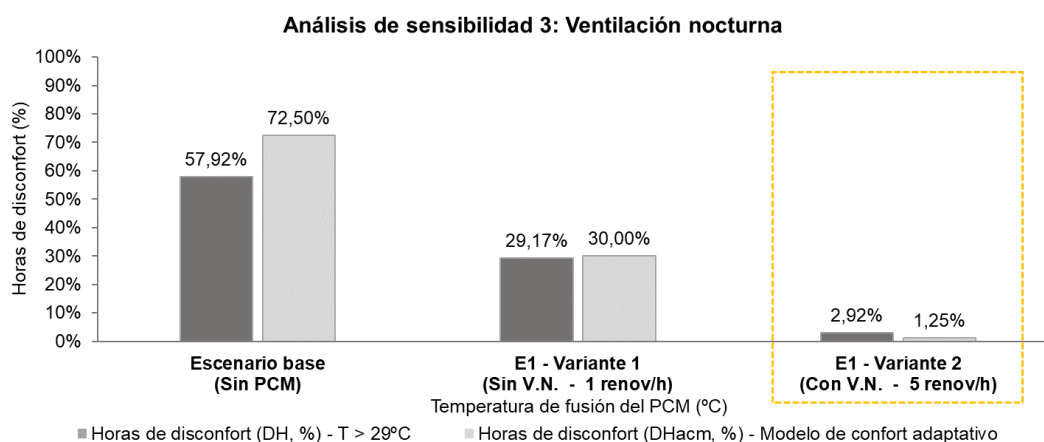
En ambas soluciones alternativas de panel arcilla-PCM, la ausencia de ventilación nocturna limita la capacidad de regeneración del panel arcilla-PCM durante el período nocturno, de manera que la liberación del calor absorbido por el panel arcilla-PCM en el día para recuperar su estado sólido se ve notablemente reducida y, con ello, la capacidad de almacenamiento de calor latente por parte de la solución en la siguiente jornada para la refrigeración pasiva del espacio interior. Si bien sólo la implementación del panel arcilla-PCM (variante 1) ya refleja mejoras en los períodos de disconfort de más del 50%, los posibles beneficios de la solución complementada con una configuración adicional (variante 2) que posibilite la regeneración eficiente del panel arcilla-PCM pueden ser muy superiores desde el punto de vista del confort y, por ende, del consumo energético y de los costes asociados al acondicionamiento del aula [106].

En este sentido, la búsqueda del flujo de aire apropiado sobre la superficie del panel arcilla-PCM posibilita un adecuado desarrollo de los ciclos de carga/descarga del panel arcilla-PCM, no sólo por favorecer la renovación del aire interior, sino por optimizar la transferencia de calor del panel y aumentar su capacidad de almacenamiento térmico de las ganancias del período diurno. El coeficiente de transferencia de calor convectivo ( $h_c$ ) para el panel arcilla-PCM constituye así un parámetro clave para la optimización de la solución.

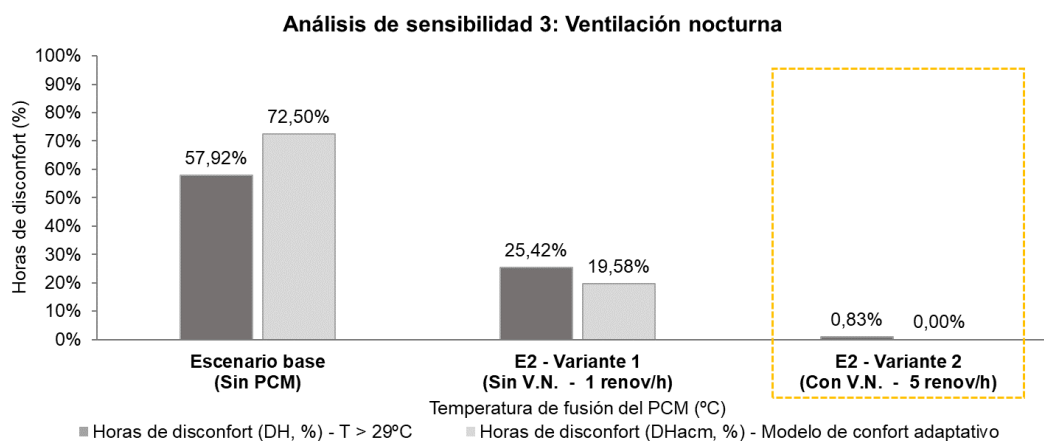
El análisis de sensibilidad 3 muestra que, tanto para la Solución panel arcilla-PCM sin ventilador (E1) como para la Solución panel arcilla-PCM con ventilador (E2), la más apropiada es la variante 2 (con ventilación nocturna) (ver **Fig. 93**), a la cual se ha aplicado el índice de renovación del aire óptimo derivado del análisis de sensibilidad 2, por lo que los porcentajes de disconfort para esta variante en este análisis son iguales al anterior. Para la variante 2 (con ventilación nocturna), los resultados de la Solución panel arcilla-PCM sin ventilador en el análisis de sensibilidad 3 muestran un periodo de disconfort severo, basado en  $T_{op} > 29^\circ\text{C}$  (DH), de 2.92%, y un periodo de disconfort definido por el modelo de confort adaptativo ( $DH_{acm}$ ), de 1.25%. Por su parte, la Solución panel arcilla-PCM con ventilador presenta un periodo de disconfort severo, basado en  $T_{op} > 29^\circ\text{C}$  (DH), de 0.83%, y un periodo de disconfort definido por el modelo de confort adaptativo ( $DH_{acm}$ ), de 0.00%.

## Variante 1 (sin ventilación nocturna) y Variante 2 (con ventilación nocturna)

### E1. Solución panel arcilla-PCM (convección natural – sin ventilador)



### E2. Solución panel arcilla-PCM (convección forzada – con ventilador)



**Fig. 93.** Análisis paramétrico de ambas soluciones alternativas de panel arcilla-PCM (E1 y E2) para la variante 1 sin ventilación nocturna (sin V.N.) y la variante 2 con ventilación nocturna (con V.N.)

#### 6.4.3. Discusión del comportamiento final de las soluciones respecto al escenario base

Para la discusión del comportamiento final de las soluciones alternativas de panel arcilla-PCM propuestas (E1 y E2), se representa la evolución de la temperatura diaria de cada escenario optimizado para su análisis comparativo con el escenario base (E0) y la oscilación de la temperatura exterior, durante el mes de junio (ver **Fig. 94**). La **Tabla 35** recoge un resumen de los resultados del escenario base y de las soluciones alternativas de panel arcilla-PCM optimizadas.

La Solución panel arcilla-PCM E1 (convección natural – sin ventilador) en la variante 2, con una temperatura de fusión del PCM de  $26^{\circ}\text{C}$ , supone una reducción del periodo de disconfort severo, basado en  $T_{op} > 29^{\circ}\text{C}$  (DH), de 95% (de 57.92% a 2.92%), y del periodo de disconfort definido por el modelo de confort adaptativo ( $DH_{acm}$ ), de 99% (de 72.50% a 1.25%). Por su parte, la Solución panel arcilla-PCM E2 (convección forzada – con ventilador), con una temperatura de fusión del PCM de  $28^{\circ}\text{C}$ , supone una reducción

del periodo de disconfort severo, basado en  $T_{op} > 29^{\circ}\text{C}$  (DH), de 99% (de 57.92% a 0.83%), y del periodo de disconfort definido por el modelo de confort adaptativo ( $\text{DH}_{\text{acm}}$ ), de 100% (de 72.50% a 0.00%).

**Tabla 35.** Resumen de los resultados para el escenario base (E0) y las soluciones alternativas de panel arcilla-PCM optimizadas (E1 y E2), junto al porcentaje de reducción del disconfort inicial proporcionado por cada una

Indicadores de comportamiento	E0. Escenario base	E1. Solución panel arcilla-PCM 26°C (convección natural – sin ventilador)	E2. Solución panel arcilla-PCM 28°C (convección forzada – con ventilador)
<b>DH – <math>T_{op} &gt; 29^{\circ}\text{C}</math></b>	57.92%	2.92% (↓ 95%)	0.83% (↓ 99%)
<b><math>\text{DH}_{\text{acm}}</math></b>	72.50%	1.25% (↓ 99%)	0.00% (↓ 100%)

Adicionalmente, la **Fig. 94** incluye un hipotético escenario para cada solución (E1\* y E2\*) donde se estaría aplicando sobre el escenario base los parámetros anteriormente evaluados (índice de renovación del aire, coeficiente de transferencia de calor convectivo) sin implementar el panel arcilla-PCM como acabado del forjado interior del aula. El interés de incluir tal escenario hipotético a la discusión reside en la posibilidad que estaría brindando para evaluar las mejoras en el confort conferidas exclusivamente por la implementación del prototipo de panel, y, al mismo tiempo, el papel que estarían desempeñando, por su parte, los parámetros adicionales en dichas mejoras.

Así, conservando todas las condiciones de contorno existentes del escenario base, por un lado, el escenario 1 sin panel arcilla-PCM (E1\*) se define con un índice de renovación del aire durante la ventilación nocturna cruzada de  $5\text{ h}^{-1}$ , y un coeficiente de transferencia de calor convectivo ( $h_c$ ) entre la superficie del forjado interior y el aire de  $11\text{ kJ/hm}^2\text{K}$  durante el período diurno y de  $32\text{ kJ/hm}^2\text{K}$  durante el período nocturno como consecuencia de dicha ventilación. Con esta configuración, el escenario 1 sin panel arcilla-PCM (E1\*) presenta un periodo de disconfort severo, basado en  $T_{op} > 29^{\circ}\text{C}$  (DH), de 6.25%, y un periodo de disconfort definido por el modelo de confort adaptativo ( $\text{DH}_{\text{acm}}$ ), de 3.33%. Respecto al escenario base, esto supone una reducción del periodo de disconfort severo, basado en  $T_{op} > 29^{\circ}\text{C}$  (DH), de 89% (de 57.92% a 6.25%), y del periodo de disconfort definido por el modelo de confort adaptativo ( $\text{DH}_{\text{acm}}$ ), de 95% (de 72.50% a 3.33%), a partir de la mejora de los parámetros adicionales para la ventilación.

Del mismo modo, el escenario 2 sin panel arcilla-PCM (E2\*) conserva las condiciones de contorno existentes del escenario base, pero se configura con un índice de renovación del aire durante la ventilación nocturna cruzada de  $5\text{ h}^{-1}$ , y un coeficiente de transferencia de calor convectivo ( $h_c$ ) entre la superficie del forjado interior y el aire de  $64\text{ kJ/hm}^2\text{K}$  constante como consecuencia de la convección forzada por el ventilador de techo. El escenario 2 sin panel arcilla-PCM (E2\*) presenta un periodo de disconfort severo, basado en  $T_{op} > 29^{\circ}\text{C}$  (DH), de 2.50%, y un periodo de disconfort definido por el modelo de confort adaptativo ( $\text{DH}_{\text{acm}}$ ), de 1.25%. Respecto al escenario base, esto supone una reducción del periodo de disconfort severo, basado en  $T_{op} > 29^{\circ}\text{C}$  (DH), de 95% (de 57.92% a 2.50%), y del periodo de disconfort definido por el modelo de confort adaptativo ( $\text{DH}_{\text{acm}}$ ), de 98% (de 72.50% a 1.25%).

Estos resultados de los escenarios hipotéticos, recogidos en la **Tabla 36** para su análisis comparativo con el escenario base y las soluciones propuestas, ponen de manifiesto que, frente a las mejoras que proporcionan dichos parámetros adicionales, la reducción

en los porcentajes de disconfort relativa exclusivamente a la implementación del panel arcilla-PCM serían más moderadas.

De hecho, a partir de estos escenarios hipotéticos, se puede deducir que la sola implementación del panel arcilla-PCM en la Solución panel arcilla-PCM sin ventilador (E1) proporciona una reducción del periodo de disconfort severo, basado en  $T_{op} > 29^{\circ}\text{C}$  (DH), de 6%, y del periodo de disconfort definido por el modelo de confort adaptativo ( $DH_{acm}$ ) de 3% respecto al escenario base (sin contar la mejora provista por los parámetros adicionales calculados en el E1\*). Por su parte, la sola implementación del panel arcilla-PCM en la Solución panel arcilla-PCM con ventilador supondría una reducción del periodo de disconfort severo, basado en  $T_{op} > 29^{\circ}\text{C}$  (DH), de 3%, y del periodo de disconfort definido por el modelo de confort adaptativo ( $DH_{acm}$ ) de 2% respecto al escenario base (sin contar la mejora provista por los parámetros adicionales calculados en el E2\*).

**Tabla 36.** Resumen de los resultados para el escenario base (E0), los escenarios hipotéticos sin panel arcilla-PCM (E1\* y E2\*) y las soluciones alternativas de panel arcilla-PCM optimizadas (E1 y E2), junto al porcentaje de reducción del disconfort inicial proporcionado de manera independiente por los parámetros de la solución

Indicadores de comportamiento	Escenario base	Solución panel arcilla-PCM 26°C (convección natural – sin ventilador)		Solución panel arcilla-PCM 28°C (convección forzada – con ventilador)	
	E0	E1*: Índice de renovación del aire y coeficiente de transferencia de calor	E1: Sólo implementación del panel	E2*: Índice de renovación del aire y coeficiente de transferencia de calor	E2: Sólo implementación del panel
<b>DH – <math>T_{op} &gt; 29^{\circ}\text{C}</math></b>	57.92%	6.25% (↓ 89%)	2.92% (↓ 6%*)	2.50% (↓ 95%)	0.83% (↓ 4%*)
<b><math>DH_{acm}</math></b>	72.50%	3.33% (↓ 95%)	1.25% (↓ 4%*)	1.25% (↓ 98%)	0.00% (↓ 2%*)

\*Respecto al escenario base, descontando la mejora (%) provista por los parámetros incluidos en E1\* y E2\*, respectivamente

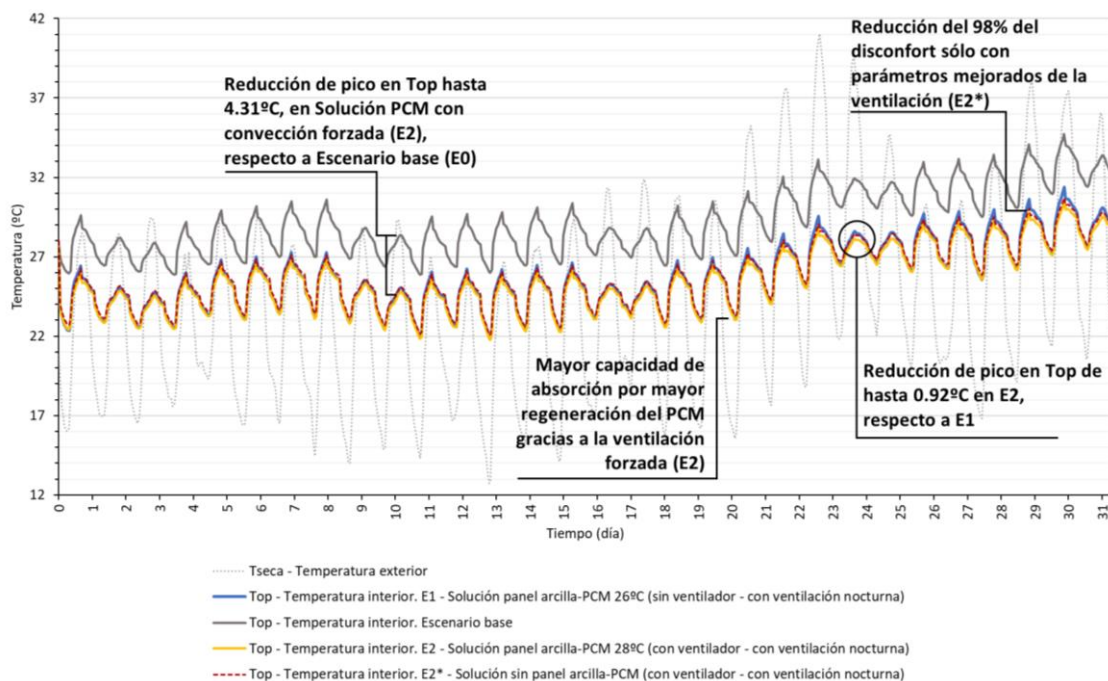
Estos resultados ponen de manifiesto las notables mejoras en los períodos de disconfort que brinda la renovación del aire interior mediante la ventilación, junto a la implementación del panel arcilla-PCM, jugando así un papel clave en la moderación de las temperaturas operativas interiores dentro de los rangos de confort. Esto se debe a que dicha renovación del aire favorece la liberación del calor absorbido por el panel (descarga) durante el día, permitiendo así la solidificación del mismo durante el período nocturno, y optimizando su capacidad de absorción de las ganancias de calor en la siguiente jornada (carga) mientras se vuelve a fundir. La ventilación nocturna permite así optimizar los modos de operación del panel arcilla-PCM y, con ello, la capacidad de almacenamiento térmico del mismo.

Por otro lado, la búsqueda del flujo apropiado de aire sobre la superficie del panel arcilla-PCM posibilita un adecuado desarrollo de sus ciclos de carga/descarga al optimizar la transferencia de calor con el aire interior. En la Solución panel arcilla-PCM sin ventilador (E1), a pesar de la ventilación nocturna, la transferencia de calor se produce por convección natural, por lo que el flujo de aire es reducido y, dadas las condiciones del aula, sus beneficios se ven más limitados. Por el contrario, la Solución panel arcilla-PCM con ventilador (E2) favorece los ciclos de regeneración del panel arcilla-PCM por la



ventilación nocturna forzada, al mejorar la liberación de calor durante la noche, aumentando la capacidad de absorción del mismo durante el día, amortiguando las temperaturas operativas pico (hasta 4.31°C en máximas y 4.12°C en mínimas) y reduciendo, con ello, los períodos de discomfort en el aula.

No obstante, para el caso de estudio, desde el punto de vista del confort, el comportamiento energético de la Solución panel arcilla-PCM E1 (convección natural – sin ventilador) muestra unos beneficios muy próximos a aquellos que adicionalmente proporciona el flujo de aire forzado de la Solución panel arcilla-PCM E2 (convección forzada – con ventilador). La reducción de los picos en la temperatura interior del aula que posibilita la solución E2 presenta una mejora respecto a la solución E1 de 0.96°C en máximas. Se detecta así la conveniencia de un análisis más pormenorizado en investigaciones futuras sobre la ventilación nocturna forzada y la configuración operacional del flujo de aire del ventilador sobre la superficie del panel arcilla-PCM, con el fin de optimizar estos parámetros y obtener mejoras más notables a partir de los beneficios de la convección forzada frente a la convección natural y justificar así su implementación junto al panel arcilla-PCM para un desarrollo eficiente de sus procesos de regeneración. En este sentido, cabe subrayar que, si bien las estrategias de la solución E2 hacia la eficiencia se pueden traducir en ahorros en los costes asociados a los sistemas de acondicionamiento activo del espacio interior, es preciso tomar en consideración en futuros estudios el coste de inversión y el consumo energético derivado del funcionamiento del ventilador de techo como parte de la implementación de esta solución.



**Fig. 94.** Evolución de la temperatura operativa interior diaria ( $T_{op}$ ) de las soluciones optimizadas, comparadas con el escenario base y la oscilación de la temperatura exterior ( $T_{seca}$ ), durante el mes de junio



## 7. Conclusiones

En el marco de los diagnósticos actuales sobre la problemática energética en el sector de la edificación, a nivel europeo se destacan como objetivos primordiales las medidas para la reducción de la demanda energética y la implementación de sistemas y tecnologías bajos en carbono más eficientes en el uso y acondicionamiento de los edificios; especialmente de aquellos sistemas y tecnologías destinados a la calefacción y refrigeración. La implementación de estrategias de acondicionamiento pasivo basadas en materiales y tecnologías de almacenamiento de energía térmica (AET o *thermal energy storage*, TES) podrían optimizar el comportamiento energético de la edificación en el camino hacia la descarbonización y la eficiencia energética del sector. Estas estrategias, aplicadas a pequeña escala como soluciones innovadoras de calefacción y refrigeración bajas en carbono, mejorarían el confort térmico al amortiguar las fluctuaciones en la temperatura interior (cargas pico), minorando así la demanda energética de los espacios y aumentando la eficiencia de los sistemas activos instalados con una menor potencia requerida; y reduciendo, por ende, el consumo de energía final [13,16].

Entre las técnicas de implementación, las relativamente recientes aplicaciones pasivas de refrigeración mediante la integración de materiales de cambio de fase (MCF o *phase change materials*, PCMs) en soluciones constructivas de muros, techos o suelos destacan por sus potenciales beneficios en el acondicionamiento de espacios interiores en la edificación [13,20,21].

En este sentido, también se detectan, por su parte, unos intereses crecientes por la revisión de las prestaciones y los métodos de caracterización y diseño de soluciones constructivas basadas en arcilla como tecnologías avanzadas de almacenamiento de energía térmica. Su potencialidad en el desarrollo de medidas energéticas bajas en carbono en el sector de la edificación no sólo se manifiesta en su elevada capacidad calorífica, junto a su baja energía incorporada; sino también en el análisis combinado de esta alta inercia térmica con su comportamiento higratérmico y con otras propiedades físico-químicas, como su espacio interlaminar, su área superficial o su estructura porosa, entre otras [21,22,25].

No obstante, actualmente el desarrollo de las líneas de investigación sobre soluciones constructivas híbridas y materiales compuestos basados en arcilla que incorporen además materiales de cambio de fase resulta ser aún muy exiguo, si bien en la hibridación de sus prestaciones físico-térmicas podrían ofrecer un amplio rango de oportunidades y beneficios para optimizar el comportamiento energético de los edificios.

En este marco, el objetivo principal de la presente investigación lo constituye el desarrollo de soluciones constructivas a base de arcilla estabilizada con aditivos naturales, combinada con materiales de cambio de fase, como tecnología innovadora de almacenamiento de energía térmica para su aplicación pasiva en la edificación, con el fin de reducir la demanda energética de los espacios interiores, mejorando tanto la eficiencia energética del edificio como las condiciones de confort y habitabilidad.

Con ello, se aspira a aportar y ampliar las líneas de investigación y el campo de tecnologías para el acondicionamiento pasivo de espacios a través de materiales prometedores para el almacenamiento de energía térmica en edificación, concretamente de la arcilla y los materiales de cambio de fase (PCMs). A tal fin, se investigan, determinan y evalúan las prestaciones y los criterios de diseño e implementación de una propuesta de solución constructiva arcilla-PCM mediante la consecución de una serie de objetivos específicos.

En base a la metodología planteada, a partir de la revisión de la literatura presente sobre soluciones constructivas basadas en arcilla y sobre el almacenamiento de energía térmica como estrategia de acondicionamiento pasivo, se presenta, en primer lugar, un estado del conocimiento, que concluye con una revisión de las líneas de desarrollo abiertas sobre soluciones de almacenamiento de energía térmica basadas en arcilla, que integren materiales de cambio de fase en su propuesta. Una vez estudiado el marco de este campo de tecnologías y materiales prometedores para la mejora del comportamiento térmico de los edificios, se sigue con la presentación y determinación de las propiedades físico-térmicas de un prototipo de solución de panel compuesto a base de arcilla estabilizada y PCM microencapsulado, siguiendo, para ello, procesos de caracterización físico-térmica por metodología experimental y cálculo numérico. En base a los resultados de esta caracterización, se lleva a cabo un análisis comparativo de la solución de panel arcilla-PCM con a otras soluciones constructivas convencionales y avanzadas. Finalmente, se analizan y evalúan estrategias de implementación de la solución constructiva basada en arcilla y PCM en edificación mediante la simulación numérica de alternativas de implementación de la misma en un caso de estudio.

A la luz de los resultados derivados del desarrollo de cada una de estas fases, se pueden extraer una serie de conclusiones.

#### **Sobre la revisión del estado de las líneas de investigación y desarrollo:**

- Se han reforzado, especialmente desde mediados del siglo XX, los proyectos de experimentación, reinterpretación y reintegración de técnicas y soluciones tradicionales basadas en arcilla, que confían en sus potenciales beneficios en el camino hacia un sector de la edificación bajo en carbono [31,32]. Estas líneas abiertas de investigación y desarrollo de soluciones avanzadas basadas en arcilla se focalizan en el estudio de las técnicas de diseño y fabricación de las soluciones constructivas tradicionales a la luz de los criterios y las normativas actuales en relación a la implementación, las prestaciones y los estándares de calidad exigibles para su aplicación en edificación [40].
- En la revisión de las soluciones avanzadas de construcción en tierra desarrolladas actualmente [40], se distingue una predominancia de la experimentación y fabricación mediante técnicas de estabilización y de refuerzo

de los materiales arcillosos para la consecución de mejoras en las prestaciones físicas, térmicas y mecánicas de soluciones constructivas tradicionales.

- En base a la literatura actualmente disponible y accesible, las soluciones basadas en arcilla, que integren materiales de cambio de fase en su propuesta como tecnologías avanzadas de almacenamiento de energía térmica, se pueden agrupar principalmente en dos categorías: soluciones de estabilización de forma de materiales de cambio de fase (SSPCM) y soluciones avanzadas de construcción con materiales arcillosos mediante la incorporación de PCM microencapsulado. Si bien la primera está compuesta por una amplia variedad de estrategias y soluciones de encapsulación de materiales de cambio de fase estabilizados mediante el uso de las arcillas como matriz porosa; la segunda categoría con propuestas de soluciones constructivas avanzadas, que corresponde propiamente al objeto de la investigación, incluye aún referencias muy escasas.
- En cuanto a esta segunda categoría de soluciones avanzadas, las propuestas revisadas en la literatura se focalizan, principalmente, en la descripción del proceso de preparación, en cuanto a materiales y métodos, y en la caracterización de las propiedades de la solución avanzada para su análisis comparativo con las de los materiales empleados en la composición o con otras soluciones constructivas tradicionales basadas en los mismos materiales constituyentes, cuya caracterización se realiza en la misma investigación o se extrae de otras referencias en la literatura. Los análisis adicionales sobre el ciclo de vida de las soluciones propuestas constituyen aproximaciones de gran interés para futuras investigaciones.

#### **Sobre la caracterización del prototipo de panel arcilla-PCM:**

- Para la caracterización térmica del panel arcilla-PCM propuesto, se desarrollan cálculos numéricos en base a la literatura revisada para su determinación a partir de las propiedades de los componentes agregados [22,76–79]. A pesar de la vocación de trabajo práctico, la implementación de medidas excepcionales por la pandemia COVID-19 ha obligado a limitar la caracterización del panel compuesto a su estudio teórico, un estudio que, no obstante, se enfoca a futuras investigaciones complementarias donde se aborden metodologías experimentales para la medición de las propiedades de tal compuesto.
- Los resultados de la caracterización térmica teórica del panel arcilla-PCM muestran que la incorporación de PCM microencapsulado en la propuesta aumenta la capacidad de almacenamiento térmico de la solución constructiva basada en arcilla, mejorando la distribución de la entalpía en función de la temperatura como resultado de la capacidad calorífica latente que aporta el material de cambio de fase. Así, la entalpía por unidad de masa (kJ/kg) del panel de arcilla+0%PCM (panel de referencia sin PCM) mejora en más de un 215% con la adición de un 10% de PCM, en un 275% con la adición de un 15% de PCM y en un 335% con la adición de un 20% de PCM. Es decir, la incorporación del PCM microencapsulado en fracciones de masa inferiores al 25% del panel podría llegar a triplicar la capacidad de almacenamiento térmico de la solución constructiva mejorada.
- Por su parte, la entalpía por unidad de superficie (kJ/m<sup>2</sup>) aumenta con mayor moderación al añadir PCM microencapsulado al panel. Esto se explica al

observar que la densidad del panel se reduce con el aumento de la concentración del PCM microencapsulado, el cual se caracteriza por una densidad cinco veces inferior a la de la arcilla. En cualquier caso, la entalpía por unidad de superficie ( $\text{kg/m}^2$ ) del panel de arcilla+0%PCM de 0.02 m de espesor se ve mejorada en un 185% con la adición de un 20% de PCM.

### **Sobre la comparación del prototipo de panel arcilla-PCM con otras soluciones:**

- En el análisis de los resultados aportados por otros equipos investigadores como potenciales de mejora y parámetros clave para optimizar el diseño, implementación y comportamiento de la solución, se concluye que es preciso considerar igualmente sus efectos e interacciones con otros parámetros relativos a la solución (tipo de microencapsulación, temperatura de fusión y capacidad calorífica aparente del PCM, espesor y densidad de la solución, rango de temperatura abarcado en ensayos) y relativos al contexto (oscilación de la temperatura exterior, caracterización del resto de elementos constructivos, horarios de ocupación y operación, sistemas auxiliares, rango de confort).
- Dada la particularidad de las condiciones de contorno y de las exigencias de implementación, así como la configuración adicional de mejora con la que se evalúa cada solución, en ninguno de los casos se puede concluir que la variación de alguno de los parámetros de la solución, o su asimilación a partir de la caracterización térmica de otra solución revisada, se pueda traducir directamente en una mejora de su capacidad de almacenamiento térmico. Esta observación se acentúa ante la falta de información pormenorizada y más contextualizada, la fragmentación metodológica e incluso, en ocasiones, la inconsistencia en la presentación de resultados que se reconoce en la mayoría de las referencias incluidas en la revisión, al menos en el formato de artículo o de ficha técnica con que se recogen.
- En cualquier caso, cabe destacar que, en la totalidad de las referencias revisadas, los resultados de la investigación permiten presentar evidencias de que, siguiendo un diseño e implementación apropiados, las soluciones mejoradas con PCM pueden contribuir a la reducción de la demanda energética en los edificios, garantizando, al mismo tiempo, el confort en el interior de los mismos. Asimismo, en un número notable de referencias, se destaca la importancia de los parámetros relativos al contexto, de las aplicaciones específicas que persigue la implementación y del diseño de métodos de control para el comportamiento óptimo de las soluciones.
- En la comparación con soluciones comercializadas, destaca la convergencia de parámetros detectada entre el prototipo de panel arcilla-PCM y la solución de panel *PCM Clay Board® 25*, la cual no sólo incorpora la misma concentración (20%) de PCM microencapsulado Micronal®, sino que también emplea el mismo materia base (arcilla estabilizada con fibras naturales). A pesar de que el valor de la entalpía de fusión también ha sido medido para una diferencia de temperatura bastante similar en ambas soluciones, la capacidad de almacenamiento térmico entre ellas sigue sin resultar directamente comparable por falta de información en la caracterización y ensayo de la solución comercializada. En cualquier caso, el estudio del proceso de fabricación de la solución comercializada ha supuesto aportes notables para futuras

investigaciones sobre el prototipo de panel mediante un trabajo más experimental.

- En cuanto a la comparación con soluciones constructivas convencionales, la capacidad de almacenamiento térmico por unidad de superficie que confiere el prototipo de panel arcilla-PCM, con 20.0 mm de espesor, supone una mejora de un 321% frente a la capacidad de un panel sándwich de 112.0 mm, y de un 308% frente a la capacidad de un panel de yeso de 15.0 mm (es decir, de un espesor 5.0 mm más fino que el panel arcilla-PCM). Esto significa que el prototipo de panel arcilla-PCM con una concentración de PCM microencapsulado del 20% podría llegar a triplicar la capacidad de almacenamiento térmico de soluciones convencionales ligeras de bajo espesor, como el panel de yeso o el panel sándwich. Por otro lado, las soluciones de fábrica de ladrillo de ½ pie y de fábrica de termoarcilla presentan una entalpía por unidad de superficie superior en un 124% y en un 206% al valor del panel arcilla-PCM, una mejora que, no obstante, supone un espesor de solución 6 veces superior al del prototipo de panel.

### **Sobre la evaluación de estrategias de implementación mediante modelos numéricos:**

- El análisis de sensibilidad 1 muestra que, para la Solución panel arcilla-PCM sin ventilador (E1) y la Solución panel arcilla-PCM con ventilador (E2), la temperatura de fusión más apropiada es de 26°C y de 28°C, respectivamente. La temperatura de fusión del PCM (°C) se presenta como un parámetro clave para la eficiencia de la solución. Una selección errónea de la temperatura de fusión imposibilitaría el almacenamiento de calor latente del panel arcilla-PCM, pues supondría que el PCM se mantuviese en estado sólido o fundido la mayor parte del tiempo, en base a la temperatura interior en el aula.
- El análisis de sensibilidad 2 muestra que, tanto para la Solución panel arcilla-PCM sin ventilador (E1) como para la Solución panel arcilla-PCM con ventilador (E2), en sus respectivas temperaturas de fusión óptimas, el índice de renovación del aire más apropiado es de 5 h<sup>-1</sup>, correspondiente a un área de apertura de ventana de 1.90 m<sup>2</sup>. En este sentido, la búsqueda del flujo de aire apropiado sobre la superficie del panel arcilla-PCM posibilita un adecuado desarrollo de los ciclos de carga/descarga del panel arcilla-PCM, no sólo por favorecer la renovación del aire interior, sino por optimizar la transferencia de calor del panel y aumentar su capacidad de almacenamiento térmico de las ganancias del período diurno. El coeficiente de transferencia de calor convectivo ( $h_c$ ) para el panel arcilla-PCM constituye así un parámetro clave para la optimización de la solución.
- El análisis de sensibilidad 3 muestra que, tanto para la Solución panel arcilla-PCM sin ventilador (E1) como para la Solución panel arcilla-PCM con ventilador (E2), la más apropiada es la variante 2 (con ventilación nocturna). Además de las ganancias internas y las condiciones climáticas, la temperatura de fusión óptima también depende de las temperaturas interiores más bajas que la ventilación nocturna puede proporcionar [106], dada su influencia sobre la capacidad de regeneración del PCM; de lo que se deriva la importancia del índice de renovación del aire durante la ventilación como parámetro clave para la optimización de la implementación.

- Los resultados de la evaluación del comportamiento final de las soluciones optimizadas muestran que la Solución panel arcilla-PCM E1 (convección natural – sin ventilador) en la variante 2 (con ventilación nocturna), con una temperatura de fusión del PCM de 26°C, supone una reducción del periodo de disconfort severo, basado en  $T_{op} > 29^{\circ}\text{C}$  (DH), de 95% (de 57.92% a 2.92%), y del periodo de disconfort definido por el modelo de confort adaptativo ( $DH_{acm}$ ), de 99% (de 72.50% a 1.25%). Por su parte, la Solución panel arcilla-PCM E2 (convección forzada – con ventilador), con una temperatura de fusión del PCM de 28°C, supone una reducción del periodo de disconfort severo, basado en  $T_{op} > 29^{\circ}\text{C}$  (DH), de 99% (de 57.92% a 0.83%), y del periodo de disconfort definido por el modelo de confort adaptativo ( $DH_{acm}$ ), de 100% (de 72.50% a 0.00%).
- No obstante, los análisis adicionales de escenarios hipotéticos sin PCM (E1\* y E2\*), en los que solo se implementasen los parámetros mejorados de la ventilación, ponen de manifiesto que esta configuración mejorada podría proporcionar, en el caso de E2\*, una reducción del periodo de disconfort severo, basado en  $T_{op} > 29^{\circ}\text{C}$  (DH), y del periodo de disconfort definido por el modelo de confort adaptativo ( $DH_{acm}$ ), de 95% y de 98%, respectivamente. Esto significa que la reducción en los porcentajes de disconfort relativa exclusivamente a la implementación del panel arcilla-PCM resulta ser relativamente reducida.
- La Solución panel arcilla-PCM con ventilador (E2) supone una reducción de los picos en la temperatura interior de hasta 4.31°C en máximas y 4.12°C en mínimas. No obstante, la reducción de los picos en la temperatura interior del aula que posibilita la solución E2 presenta una mejora respecto a la solución E1 de 0.96°C en máximas, por lo que, desde el punto de vista del confort, el comportamiento energético de la Solución panel arcilla-PCM E1 (convección natural – sin ventilador) muestra unos beneficios relativamente próximos a aquellos que adicionalmente proporciona el flujo de aire forzado de la Solución panel arcilla-PCM E2 (convección forzada – con ventilador). Se detecta así la conveniencia de un análisis más pormenorizado en investigaciones futuras sobre la ventilación nocturna forzada y la configuración operacional del flujo de aire del ventilador sobre la superficie del panel arcilla-PCM.



## 8. Futuras líneas de investigación

Dada la vocación por avanzar en las líneas de investigación y el campo de tecnologías para el acondicionamiento pasivo de espacios a través de unos materiales prometedores para el almacenamiento de energía térmica, a partir de este trabajo, se estima de gran importancia destacar la necesidad de investigaciones ulteriores respecto a cuestiones como las que siguen.

- La implementación de medidas excepcionales por la pandemia COVID-19 ha obligado a limitar la caracterización del panel compuesto a su estudio teórico, un estudio que, no obstante, se enfoca a futuras investigaciones complementarias donde se aborden metodologías experimentales para la medición de las propiedades y prestaciones de esta solución, mediante la preparación de muestras de ensayo, que permitan, a su vez, analizar los procesos de composición y fabricación más allá de las hipótesis planteadas en este trabajo. Entre los ensayos para la caracterización experimental del panel arcilla-PCM, se destacan, en primer lugar, aquellos necesarios para la caracterización térmica del panel, que permitan aportar resultados experimentales a los análisis comparativos. En segundo lugar, se destaca la necesidad de llevar a cabo los ensayos pertinentes para la cuantificación de las variaciones en las propiedades mecánicas de las muestras, a fin de optimizar la concentración de los materiales de estabilización y del PCM microencapsulado. Por último, dadas las características de los materiales arcillosos, se considera de igual importancia la consecución de ensayos experimentales sobre el comportamiento higroscópico de la solución de panel.
- En este sentido, se destaca igualmente la necesidad de análisis adicionales sobre el ciclo de vida de la propuesta de panel, que presenten el impacto de los materiales y tecnologías integrados en la misma, dando paso a nuevos parámetros de optimización.
- En base a la literatura actualmente disponible y accesible sobre estas líneas de investigación, las soluciones constructivas avanzadas de TES basadas en arcilla que se han podido revisar para el presente trabajo se presentan aún muy escasas y recientes, incluyendo el mercado de soluciones comercializadas para su aplicación en edificación. Por ello, se precisan revisiones ulteriores que incluyan referencias más extensas y/o recientes sobre estas soluciones.
- Para los modelos numéricos de las estrategias de implementación de la solución de panel arcilla-PCM desarrollados para el presente trabajo, se decide considerar sólo las variaciones en el coeficiente de transferencia de calor por convección ( $h_c$ ) sobre la superficie del panel arcilla-PCM, a fin de facilitar una primera aproximación al modelado numérico de escenarios de tal complejidad.

- Por ello, se precisa de modelados numéricos más complejos para la evaluación del comportamiento real de estas soluciones, en los que se incluyan los efectos de la ventilación sobre el resto de superficies del escenario (incluidos los ocupantes), lo que se traduciría en una mejora de las temperaturas operativas aceptables por el modelo de confort adaptativo.

## 9. Bibliografía

- [1] Calvino I. *Las ciudades invisibles*. Madrid: Siruela; 2007.
- [2] Calderón Peñafiel JC. Estudio experimental de geopolímeros de arcillas en función de la resistencia mecánica [Tesis, Universitat Politècnica de Catalunya]. 2019.
- [3] Quispe CN. Análisis de la Energía Incorporada y Emisiones de CO2 Aplicado a Viviendas Unifamiliares de Eficiencia Energética [Tesina Final de Máster, Universitat Politècnica de Catalunya]. 2016.
- [4] IPCC. *Cambio climático 2014: Informe de Síntesis*. 2014.
- [5] Ritchie H, Roser M. *OurWorldInData - Fossil Fuels*. 2017. <https://ourworldindata.org/fossil-fuels>.
- [6] Smil V. *Energy transitions: global and national perspectives*. Santa Barbara: Praeger; 2017.
- [7] International Energy Agency (IEA). *World Energy Balances: Overview*. 2020. <https://www.iea.org/reports/world-energy-balances-overview>.
- [8] Consejería de Empleo Empresa y Comercio. Junta de Andalucía. *Estrategia minera de Andalucía 2020*. 2016.
- [9] Vázquez Espí M. Construcción e impacto sobre el ambiente: El caso de la tierra y otros materiales. *Inf La Construcción* 2001;52. <https://doi.org/10.3989/ic.2001.v52.i471.681>.
- [10] Commission E. Directive (EU) 2018/844 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency. 2018. [https://doi.org/10.1007/3-540-47891-4\\_10](https://doi.org/10.1007/3-540-47891-4_10).
- [11] Programme UNE. *2020 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector*. Nairobi: 2020.
- [12] International Energy Agency (IEA). *Technology Roadmap. Energy efficient building envelopes*. 2013.
- [13] Lizana Moral FJ. *Advanced thermal energy storage and management solutions towards low-carbon buildings. Materials, applications and decision support strategies* [Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla]. 2019.
- [14] Gross R, Hanna R. Path dependency in provision of domestic heating. *Nat Energy* 2019;4:358–64. <https://doi.org/10.1038/s41560-019-0383-5>.
- [15] International Energy Agency (IEA). *Energy Storage Implementing Agreement. International Energy Agency Technology Collaboration Programme*. 2020.
- [16] Oliver Ramírez A. Integración de materiales de cambio de fase en placas de yeso reforzadas con fibras de polipropileno [Tesis Doctoral, Universidad Politècnica de

- Madrid]. 2009.
- [17] European Commission. Horizon 2020: Work Programme 2016 – 2017. 2015.
- [18] Lizana J, Chacartegui R, Barrios-Padura A, Ortiz C. Advanced low-carbon energy measures based on thermal energy storage in buildings: A review. *Renew Sustain Energy Rev* 2018;82:3705–49. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.093>.
- [19] Navarro L, de Gracia A, Colclough S, Browne M, McCormack SJ, Griffiths P, et al. Thermal energy storage in building integrated thermal systems: A review. Part 1. active storage systems. *Renew Energy* 2016;88:526–47. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.11.040>.
- [20] Jeong SG, Jin Chang S, We S, Kim S. Energy efficient thermal storage montmorillonite with phase change material containing exfoliated graphite nanoplatelets. *Sol Energy Mater Sol Cells* 2015;139:65–70. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.03.010>.
- [21] Sari A. Fabrication and thermal characterization of kaolin-based composite phase change materials for latent heat storage in buildings. *Energy Build* 2015;96:193–200. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.03.022>.
- [22] Lv P, Liu C, Rao Z. Review on clay mineral-based form-stable phase change materials: Preparation, characterization and applications. *Renew Sustain Energy Rev* 2017;68:707–26. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.014>.
- [23] Voronin D V., Ivanov E, Gushchin P, Fakhrullin R, Vinokurov V. Clay composites for thermal energy storage: A review. *Molecules* 2020;25:1–26. <https://doi.org/10.3390/molecules25071504>.
- [24] Rempel AR, Rempel AW. Rocks, clays, water, and salts: Highly durable, infinitely rechargeable, eminently controllable thermal batteries for buildings. vol. 3. 2013. <https://doi.org/10.3390/geosciences3010063>.
- [25] Soudani L, Woloszyn M, Fabbri A, Morel JC, Grillet AC. Energy evaluation of rammed earth walls using long term in-situ measurements. *Sol Energy* 2017;141:70–80. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.11.002>.
- [26] Mileto C, Vegas F. La restauración de la tapia en la Península Ibérica. Criterios, técnicas, resultados y perspectivas. 2013.
- [27] Guillaud H, Avrami E, Hardy M. Terra Literature Review. An Overview of Research in Earthen Architecture Conservation. 2008.
- [28] Galán Marín C, Rivera-Gómez C, Bradley F. Innovative use of unfired brick and clay products as a more sustainable alternative. *Brick and Mortar Res.*, Nueva York: Nova Science Publishers; 2012.
- [29] Gómez Patrocinio FJ. Arquitectura tradicional de tierra en España. Caracterización constructiva, fenómenos de degradación y dinámicas de intervención [Tesis Doctoral Tomo I, Universitat Politècnica de València]. 2018.
- [30] CRAterre-ENSAG. CRAterre. Cultures constructives et développement durable - Chaire UNESCO. n.d. <http://craterre.org/enseignement:chaire-unesco/>.
- [31] Vegas López-Manzanares F, Mileto C, Cristini V, García Soriano L, Garcia Saez S. Técnicas constructivas autóctonas en tierra: la arquitectura tradicional de la llanura panónica. *Arché Publicación Del Inst Univ Restauración Del Patrim La Upv* 2011:315–22.
- [32] Barros M. Consolidación material para arquitectura patrimonial de tierra. Aplicación del FCC como posible material consolidante [Trabajo Fin de Máster, Universitat Politècnica de València]. 2019.
- [33] Rodríguez Larraín S, Vargas Neumann J. (27 y 29 de marzo de 2019) Materiales,

- componentes de la tierra, canteras y pruebas de campo. 1º Curso-taller en conservación del patrimonio edificado Qhapaq Ñan. Centro Tierra - INTE PUCP. 2017.
- [34] Lan Y, Liu Y, Li J, Chen D, He G, Parkin IP. Natural Clay-Based Materials for Energy Storage and Conversion Applications. *Adv Sci* 2021;8:1–25. <https://doi.org/10.1002/advs.202004036>.
- [35] Christidis GE. Industrial clays. *European Mineralogical Union Notes in Mineralogy*. 2011;9:341–414. <https://doi.org/10.1180/EMU-notes.9.9>.
- [36] Dominguez JM, Schifter I. *Las arcillas: el barro noble*. 2010.
- [37] Gillott JE. *Clay in Engineering Geology*. Amsterdam: Elsevier; 1987.
- [38] Houben H, Guillaud H. *Traité de construction en terre*. Marseille: Éditions Parenthèses; 2006.
- [39] Hispalyt. *Catálogo de Soluciones Cerámicas para el cumplimiento del CTE*. 2008.
- [40] Giuffrida G, Caponetto R, Cuomo M. An overview on contemporary rammed earth buildings: Technological advances in production, construction and material characterization. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci* 2019;296. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/296/1/012018>.
- [41] Shi X, Yang W. Performance-driven architectural design and optimization technique from a perspective of architects. *Autom Constr* 2013;32:125–35. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.01.015>.
- [42] AG HK. HART KERAMIK AG. Lemix Clay Building Boards n.d. <https://hart-keramik.de/en/>.
- [43] GmbH W. WEM GmbH n.d. <https://wall-heating.com/home.html>.
- [44] CLAYTEC. Building with Clay n.d. <https://www.claytec.de/en>.
- [45] BIOTERRE P. BIOTERRE Bloc BTC n.d. <http://www.bioterre.es/>.
- [46] Neila González J. *Arquitectura bioclimática en un entorno sostenible*. Madrid: Munillalera; 2004.
- [47] Neila J, Varela S. *The architectural culture of the Eurasian Mediterranean region: a testimony of satisfactory design for urban infrastructures* 2014. <https://doi.org/10.5176/2251-3701>.
- [48] Neila J. *La arquitectura vernácula más sostenible*. 2017.
- [49] Lizana J, Chacartegui R, Barrios-Padura A, Valverde JM. Advances in thermal energy storage materials and their applications towards zero energy buildings: A critical review. *Appl Energy* 2017;203:219–39. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.06.008>.
- [50] Lizana J, Chacartegui R, Barrios-Padura Á, Valverde JM. Characterization of thermal energy storage materials for building applications. *B Proc 3rd Int Congr Sustain Constr Eco-Efficient Solut* 2017:606–20.
- [51] Lizana J, Chacartegui R, Barrios-Padura Á, Valverde JM. Caracterización de materiales de almacenamiento de energía térmica para aplicaciones en edificación. *3er Congr Int Construcción Sosten y Soluciones Eco-Eficientes* 2017:221–637.
- [52] Oliver A, Neila FJ, García A. Incorporación de materiales de cambio de fase en placas de yeso para almacenamiento de energía térmica mediante calor latente: Caracterización térmica del material mediante la técnica DSC. *Inf La Constr* 2011;63:61–70. <https://doi.org/10.3989/ic.09.039>.
- [53] Mousavi S, Rismanchi B, Brey S, Aye L. PCM embedded radiant chilled ceiling: A state-of-the-art review. *Renew Sustain Energy Rev* 2021;151:111601.

- <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111601>.
- [54] Tatsidjodoung P, Le Pierrès N, Luo L. A review of potential materials for thermal energy storage in building applications. *Renew Sustain Energy Rev* 2013;18:327–49. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.025>.
- [55] Yu N, Wang RZ, Wang LW. Sorption thermal storage for solar energy. *Prog Energy Combust Sci* 2013;39:489–514. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2013.05.004>.
- [56] Dominici F, Miliozzi A, Torre L. Thermal Properties of Shape-Stabilized Phase Change Materials Based on Porous Supports for Thermal Energy Storage. *Energies* 2021;14. <https://doi.org/10.3390/en14217151>.
- [57] Serrano S, Barreneche C, Rincón L, Boer D, Cabeza LF. Optimization of three new compositions of stabilized rammed earth incorporating PCM: Thermal properties characterization and LCA. *Constr Build Mater* 2013;47:872–8. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.018>.
- [58] Alassaad F, Touati K, Levacher D, Sebaibi N. Impact of phase change materials on lightened earth hygroscopic, thermal and mechanical properties. *J Build Eng* 2021;41:102417. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102417>.
- [59] Rivera-Gómez C, Galán-Marín C, López-Cabeza VP, Diz-Mellado E. Sample key features affecting mechanical, acoustic and thermal properties of a natural-stabilised earthen material. *Constr Build Mater* 2021;271. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121569>.
- [60] Andalusian Ceramic Technology Center, INNOVARCILLA Foundation. n.d. <http://www.innovarcilla.es/>.
- [61] Galán-Marín C, Rivera-Gómez C, Bradley F. Ultrasonic, molecular and mechanical testing diagnostics in natural fibre reinforced, polymer-stabilized earth blocks. *Int J Polym Sci* 2013;2013. <https://doi.org/10.1155/2013/130582>.
- [62] Rivera-Gómez C, Galán-Marín C, Bradley F. Analysis of the influence of the fiber type in polymer matrix/fiber bond using natural organic polymer stabilizer. *Polymers (Basel)* 2014;6:977–94. <https://doi.org/10.3390/polym6040977>.
- [63] CIMAPREM Food and Pharma Ingredients. n.d. <http://www.cimaprem.com/>.
- [64] Microtek Laboratories, Inc. n.d. <https://www.microteklabs.com/>.
- [65] BASF The Chemical Company. Catalogue Climate Control Micronal® PCM. 2010.
- [66] Bake M, Shukla A, Liu S. Development of gypsum plasterboard embodied with microencapsulated phase change material for energy efficient buildings. *Mater Sci Energy Technol* 2021;4:166–76. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2021.05.001>.
- [67] BASF The Chemical Company. Micronal® PCM. Intelligent Temperature Management for Buildings. n.d.
- [68] Sari A, Alkan C, Altıntaş A. Preparation, characterization and latent heat thermal energy storage properties of micro-nanoencapsulated fatty acids by polystyrene shell. *Appl Therm Eng* 2014;73:1160–8. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.09.005>.
- [69] Toppi T, Mazzarella L. Gypsum based composite materials with micro-encapsulated PCM: Experimental correlations for thermal properties estimation on the basis of the composition. *Energy Build* 2013;57:227–36. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.11.009>.
- [70] Konuklu Y, Ostry M, Paksoy HO, Charvat P. Review on using microencapsulated phase change materials (PCM) in building applications. *Energy Build* 2015;106:134–55. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.019>.

- [71] Microtek Laboratories. Microtek Laboratories Announces Acquisition of the Micronal Product Line from BASF. (17 de mayo de 2017). n.d. <https://microteklabs.com/micronal.pdf>.
- [72] Jaworski M, Abeid S. Thermal conductivity of gypsum with incorporated phase change material (PCM) for building applications. *J Power Technol* 2011;91:49–53.
- [73] Pomianowski M, Heiselberg P, Jensen RL, Cheng R, Zhang Y. A new experimental method to determine specific heat capacity of inhomogeneous concrete material with incorporated microencapsulated-PCM. *Cem Concr Res* 2014;55:22–34. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.09.012>.
- [74] Rady M, Arquis E. A comparative study of phase changing characteristics of granular phase change materials using DSC and T-History methods. *Fluid Dyn Mater Process* 2010;6:137–52. <https://doi.org/10.3970/fdmp.2010.006.137>.
- [75] Wang Z, Qiao Y, Liu Y, Bao J, Gao Q, Chen J, et al. Thermal storage performance of building envelopes for nearly-zero energy buildings during cooling season in Western China: An experimental study. *Build Environ* 2021;194:107709. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107709>.
- [76] Pomianowski M, Jensen RL. Heat storage in concrete deck with nano- and micro-encapsulated PCM. Elsevier Inc.; 2019. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817854-6.00013-1>.
- [77] Li C, Yu H, Song Y. Experimental investigation of thermal performance of microencapsulated PCM-contained wallboard by two measurement modes. *Energy Build* 2019;184:34–43. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.11.032>.
- [78] Pomianowski M. Energy Optimized Configuration of Concrete Element with PCM. 2013. <https://doi.org/10.13052/rp-9788793102491>.
- [79] Pomianowski M, Heiselberg P, Jensen RL. Dynamic heat storage and cooling capacity of a concrete deck with PCM and thermally activated building system. *Energy Build* 2012;53:96–107. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.07.007>.
- [80] Oliver A. Thermal characterization of gypsum boards with PCM included: Thermal energy storage in buildings through latent heat. *Energy Build* 2012;48:1–7. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.01.026>.
- [81] Dincer I. On thermal energy storage systems and applications in buildings. *Energy Build* 2002;34:377–88. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(01\)00126-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00126-8).
- [82] Mavrigiannaki A, Ampatzi E. Latent heat storage in building elements: A systematic review on properties and contextual performance factors. *Renew Sustain Energy Rev* 2016;60:852–66. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.115>.
- [83] Casini M. Smart Buildings Advanced Materials and Nanotechnology to Improve Energy Efficiency and Environmental Performance. Elsevier; 2016.
- [84] Kośny J. PCM-Enhanced Building Components : An Application of Phase Change Materials in Building Envelopes and Internal Structures. Springer International Publishing; 2015.
- [85] Gowreesunker BL, Tassou SA. Effectiveness of CFD simulation for the performance prediction of phase change building boards in the thermal environment control of indoor spaces. *Build Environ* 2013;59:612–25. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.10.004>.
- [86] Kuznik F, Virgone J, Roux JJ. Energetic efficiency of room wall containing PCM wallboard: A full-scale experimental investigation. *Energy Build* 2008;40:148–56. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.01.022>.
- [87] DuPont™ UK. DuPont de Nemours, Inc. n.d. <https://www.dupont.co.uk/>.

- [88] Kalnæs SE, Jelle BP. Phase change materials and products for building applications: A state-of-the-art review and future research opportunities. *Energy Build* 2015;94:150–76. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.02.023>.
- [89] De Abreu DD, Neto RC, Aelenei L, Silva CAS. Modelling and experimenting thermal energy storage through the use of PCM in low thermal inertia office. *5th Int Conf Power Gener Syst Renew Energy Technol PGSRET 2019* 2019. <https://doi.org/10.1109/PGSRET.2019.8882725>.
- [90] Knauf Gips KG. Catálogo Knauf Comfortboard® Control Térmico Inteligente. 2015. <https://www.knauf.es/>.
- [91] Rigips Saint-Gobain. Alba® balance 23°C. n.d. <https://www.rigips.ch/de/home>.
- [92] Rigips Saint-Gobain. Alba® balance 25°C. n.d. <https://www.rigips.ch/de/home>.
- [93] Datum Phase Change Ltd. ThermaCool® Phase Change Technology n.d. <https://therma.cool/>.
- [94] Datum Phase Change. RACUS® Ceiling tile. Passive thermal comfort from the most advanced phase change technology n.d. <https://therma.cool/>.
- [95] Boussaba L, Lefebvre G, Makhlof S, Grados A, Royon L. Investigation and properties of a novel composite bio-PCM to reduce summer energy consumptions in buildings of hot and dry climates. *Sol Energy* 2021;214:119–30. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.11.060>.
- [96] Sari A. Composites of polyethylene glycol (PEG600) with gypsum and natural clay as new kinds of building PCMs for low temperature-thermal energy storage. *Energy Build* 2014;69:184–92. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.10.034>.
- [97] Neeper DA. Thermal dynamics of wallboard with latent heat storage. *Sol Energy* 2000;68:393–403. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00012-8](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00012-8).
- [98] Rudd AF. Phase-change material wallboard for distributed thermal storage in buildings. *ASHRAE Trans* 1993;99:339–46.
- [99] Zhou T, Darkwa J, Kokogiannakis G. Thermal evaluation of laminated composite phase change material gypsum board under dynamic conditions. *Renew Energy* 2015;78:448–56. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.01.025>.
- [100] Darkwa J, Su O, Zhou T. Development of non-deform micro-encapsulated phase change energy storage tablets. *Appl Energy* 2012;98:441–7. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.04.006>.
- [101] Guiavarch A, Bruneau D, Peupartier B. Evaluation of Thermal Effect of PCM Wallboards by Coupling Simplified Phase Change Model with Design Tool. *J Build Constr Plan Res* 2014;02:12–29. <https://doi.org/10.4236/jbcpr.2014.21002>.
- [102] Darkwa K, Kim JS. Dynamics of energy storage in phase change drywall systems. *Int J Energy Res* 2005;29:335–43. <https://doi.org/10.1002/er.1062>.
- [103] Mavrigiannaki A, Ampatzi E. Latent heat storage in building elements : A systematic review on properties and contextual performance factors. *Renew Sustain Energy Rev* 2016;60:852–66. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.115>.
- [104] EBB Eco Building Boards - Sustainable Drywall Solutions for Today. Unfired Clay Boards & PCM Elements n.d. <https://ecobuildingboards.weebly.com/>.
- [105] EBB Eco Building Boards. Catalogue Eco Building Boards. Clay building board with latent heat storage material n.d.
- [106] Lizana J, de-Borja-Torrejon M, Barrios-Padura A, Auer T, Chacartegui R. Passive cooling through phase change materials in buildings. A critical study of implementation



- alternatives. *Appl Energy* 2019;254:113658.  
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113658>.
- [107] Consejería de Educación. Agencia Andaluza de Evaluación Educativa. Buenas prácticas del IES Chaves Nogales. Programa ALDEA. 2016.
- [108] Ramírez RC, Padura ÁB, Villanueva JAB, Bulté HC, Navarro RF, Saez IG, et al. ClimACT. Acting for the transition to a low carbon economy in schools - development of support tools. 2016. <http://www.climact.net/>.
- [109] Kalaiselvam S, Parameshwaran R. *Thermal Energy Storage Technologies for Sustainability : Systems Design, Assessment and Applications*. San Diego: Elsevier Science & Technology; 2014.
- [110] AICIA. Grupo de Termotecnia de la Escuela Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad de Sevilla. Condiciones de aceptación de Procedimientos alternativos a LIDER y CALENER. *Inst Para La Divers y Ahorr La Energía (IDAE)*, 2009;138:138.
- [111] ISO 13790:2008. Energy performance of buildings-Calculation of energy use for space heating and cooling. 2008.
- [112] AEMET. Agencia Estatal de Metereología n.d. <http://www.aemet.es/>.
- [113] Villar SJ. Modelado dinámico de autobuses para el cálculo de la carga térmica. Aplicación al dimensionado del sistema de climatización [Trabajo Fin de Máster, Universidad de Sevilla]. 2015.
- [114] ISO 7730:2006. Ergonomía del ambiente térmico. Determinación analítica e interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de bienestar térmico local. 2006.
- [115] EN 15242:2007. Ventilation for buildings. Calculation methods for the determination of air flow rates in buildings including infiltration. 2007.
- [116] Plesner C, Larsen T, Leprince V. Calculation methods for single-sided natural ventilation - simplified or detailed?. *CLIMA 2016 - proceedings of the 12th REHVA World Congress: volume 5*. 2016.
- [117] ISO 13789:2017. Thermal performance of buildings. Transmission and ventilation heat transfer coefficients. Calculation method. 2017.
- [118] Johra H, Heiselberg P. Influence of internal thermal mass on the indoor thermal dynamics and integration of phase change materials in furniture for building energy storage: A review. *Renew Sustain Energy Rev* 2017;69:19–32.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.145>.
- [119] TRNSYS. Manual TRNSYS v18. A transient system simulation program. 2017.  
<http://www.trnsys.com/>.
- [120] ASHRAE Guideline Project Committee 14. ASHRAE Guideline 14-2014. Measurement of Energy, Demand, and Water Savings. *ASHRAE Guidel 14-2014* 2014;4:1–150.
- [121] Košný J, Yarbrough DPE, Miller W, Petrie T, Childs P, Syed AM, et al. PCM-Enhanced Building Envelopes in Current ORNL Research Projects. 2006.
- [122] Dentel A, Stephan W. TRNSYS 17 TYPE 399. Phase change materials in passive and active wall constructions. Model description and implementing into TRNSYS. 2013.
- [123] Claros-Marfil LJ, Dentel A, Padiál JF, Lauret B. Active and passive PCM walls simulation – a new TRNSYS PCM-Type. 1st International Congress on research in Construction and Architectural Technologies. 2014.
- [124] Xu J, Psikuta A, Li J, Annaheim S, Rossi RM. A numerical investigation of the influence of wind on convective heat transfer from the human body in a ventilated room. *Build*

- Environ 2021;188. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107427>.
- [125] López JC. Simulación numérica de la ventilación dentro de recintos habitables para su acondicionamiento [Tesis Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México]. 2014.
- [126] Sanchez J, Salmerón JM, Sanchez FJ, Alvarez S, Molina JL. Natural ventilation: CFD aerodynamic study about passive extractor and windcatcher. *Rev Ing Constr* 2012;27:40–56.
- [127] Yanbing K, Yi J, Yinping Z. Modeling and experimental study on an innovative passive cooling system - NVP system. *Energy Build* 2003;35:417–25. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00141-X](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00141-X).
- [128] Hed G, Bellander R. Mathematical modelling of PCM air heat exchanger. *Energy Build* 2006;38:82–9. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.04.002>.
- [129] EN 16798-1:2020. Energy performance of buildings. Ventilation for buildings. Part 1: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoust 2020.
- [130] Godoy Muñoz A. El confort térmico adaptativo. Aplicación en la edificación en España [Trabajo Fin de Máster, Universitat Politècnica de Catalunya]. 2012.
- [131] Gallego I. Análisis de la influencia de los modelos de confort adaptativo en los costos de ejecución para mejoramientos de la envolvente térmica de viviendas sociales en Concepción, Chile [Tesis Maestría, Universidad del Bío-Bío - Universidad de Sevilla]. 2017.
- [132] De Dear R, Brager G, Cooper D. Final report ASHRAE RP-884. Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. *ASHRAE Trans* 1997.
- [133] Orosa JA. Research on the origins of thermal comfort. *Eur J Sci Res* 2009;34:561–7.
- [134] Sánchez-García D. Desarrollo de un modelo energético de edificio basado en algoritmos de confort adaptativo bajo el cambio climático: Adaptive-Comfort-Control-Implemented-Model (ACCIM) [Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla]. 2020.
- [135] Carlucci S, Bai L, de Dear R, Yang L. Review of adaptive thermal comfort models in built environmental regulatory documents. *Build Environ* 2018;137:73–89. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.03.053>.





## Anexos

Anexo A. Termogramas de los ensayos por calorimetría diferencial de barrido mediante rampa lineal (DSC) y mediante rampa modulada (MDSC) para la caracterización térmica de cada tipo de arcilla (SR, SY, SB), en base a la siguiente nomenclatura: SR-1, SR-2 y SR-3 para las tres muestras de arcilla roja (SR); SY-1, SY-2 y SY-3 para las tres muestras de arcilla amarilla (SY); y SB-1, SB-2 y SB-3 para las tres muestras de arcilla negra (SB).

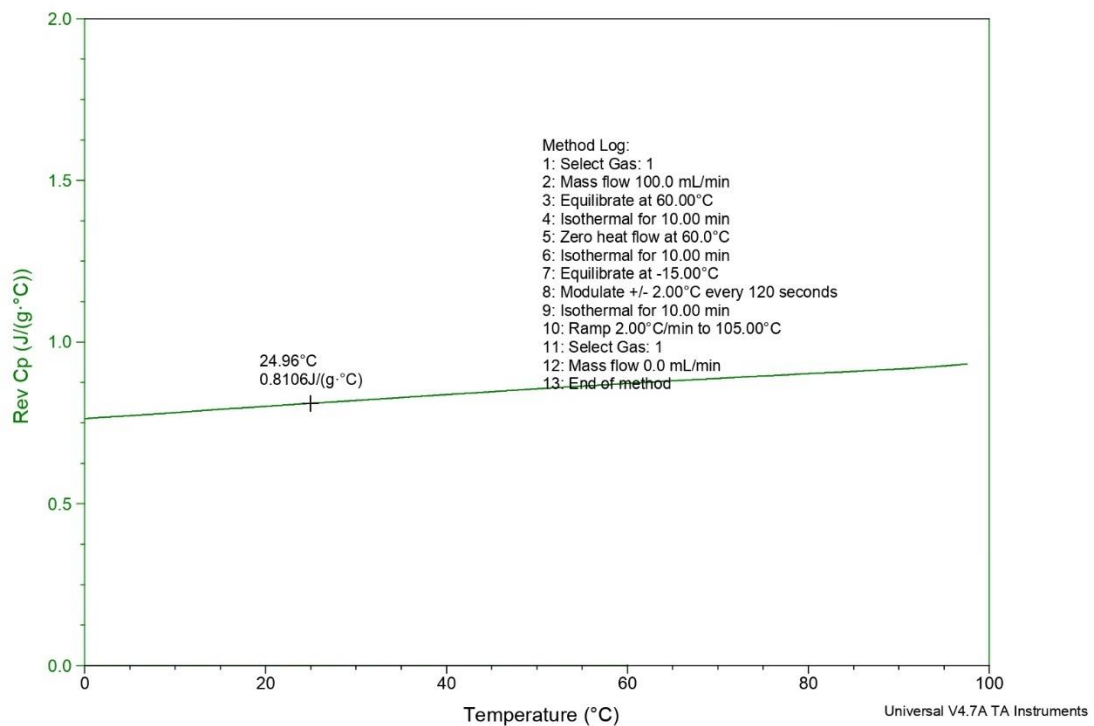
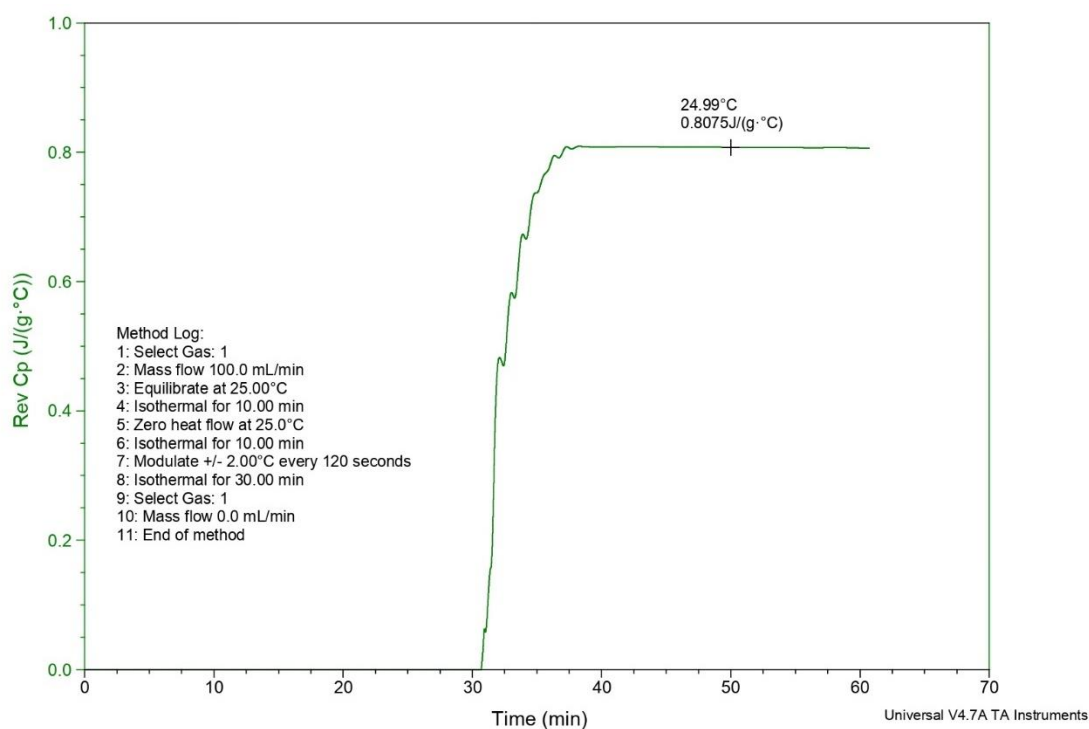
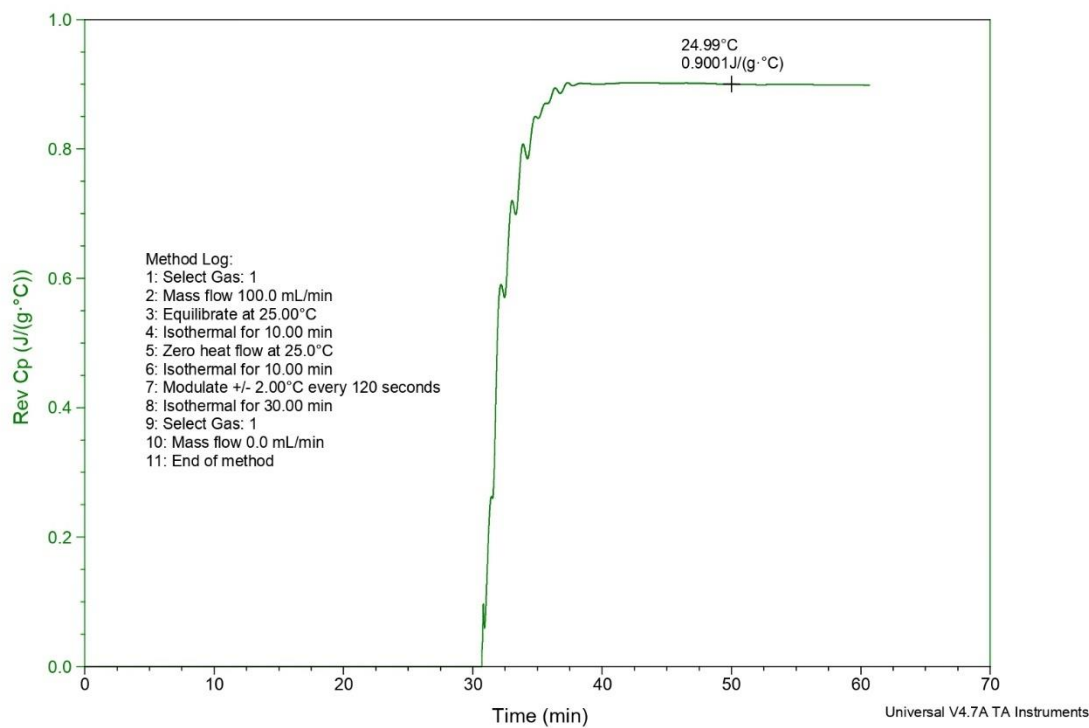


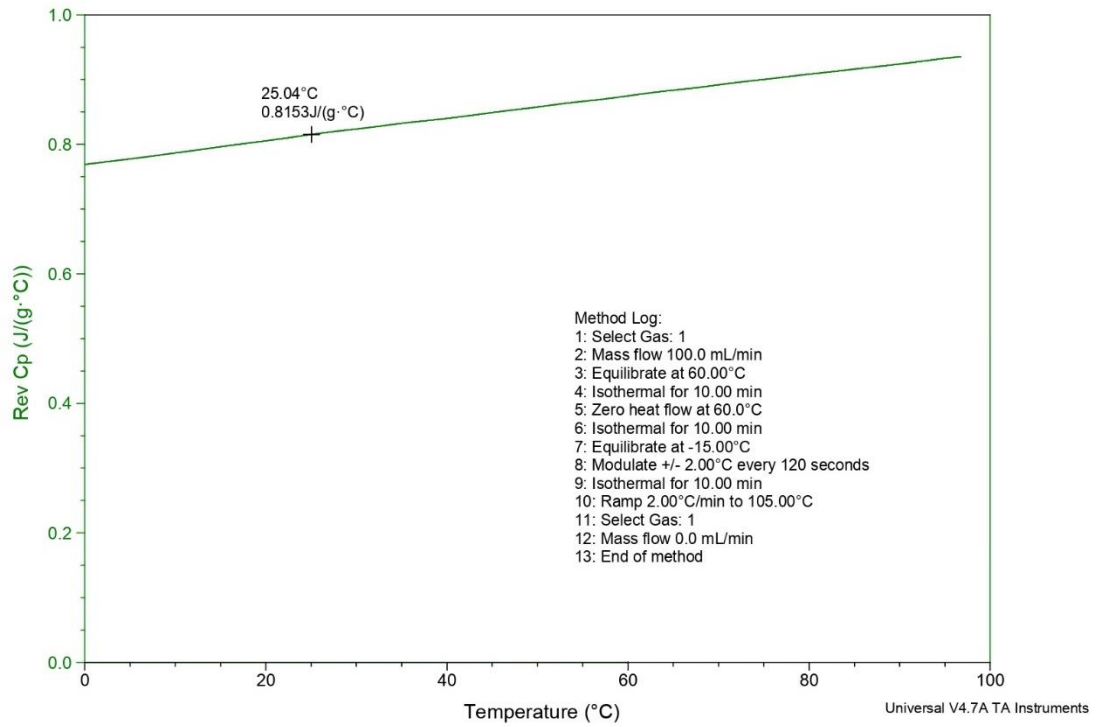
Fig. 46. Termograma por calorimetría diferencial de barrido mediante rampa modulada (MDSC) de la muestra SR-1 de la arcilla roja (SR)



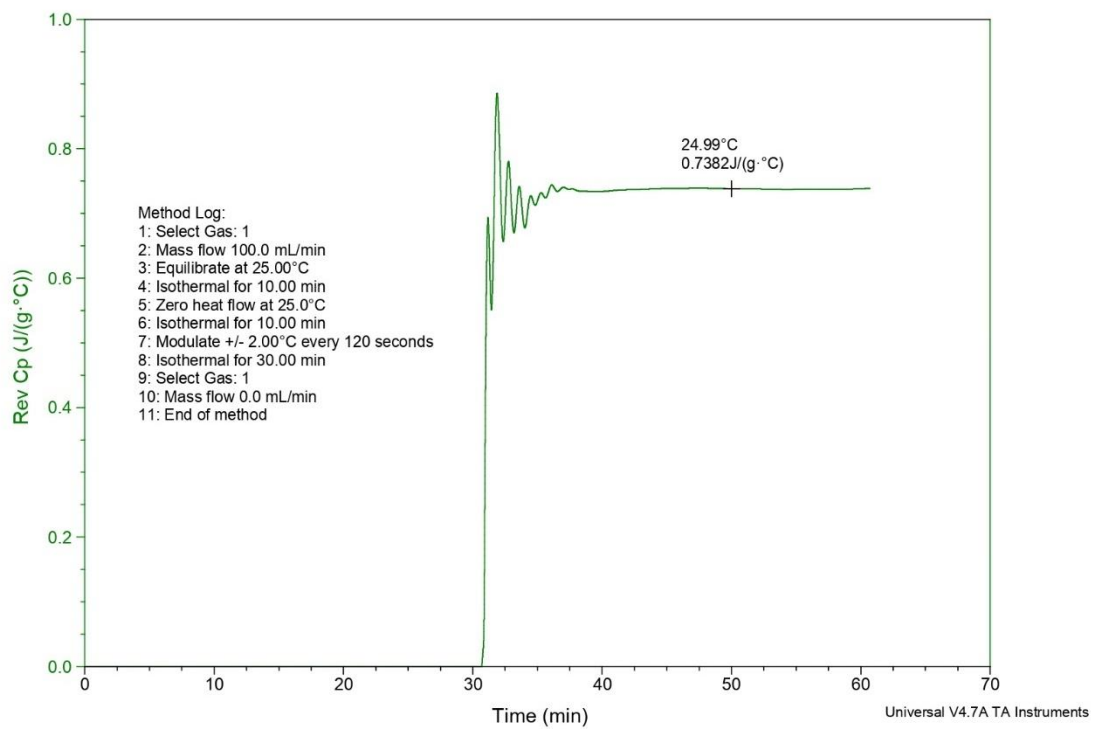
**Fig. 47.** Termograma por calorimetría diferencial de barrido mediante rampa lineal (DSC) de la muestra SR-2 de la arcilla roja (SR)



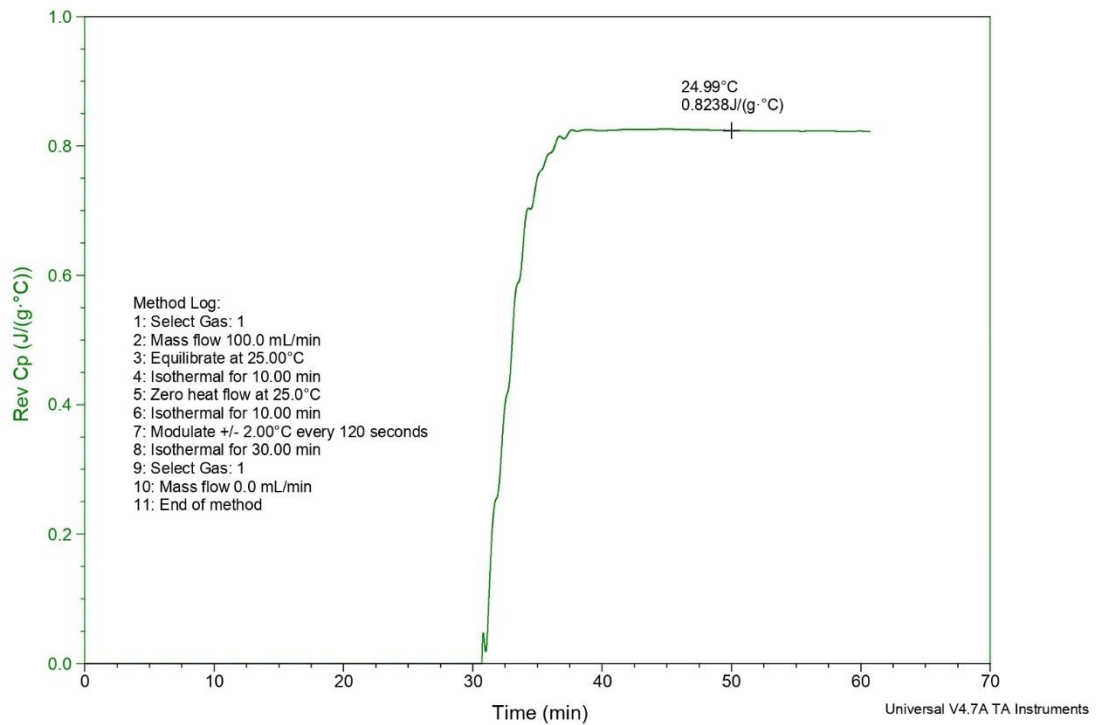
**Fig. 48.** Termograma por calorimetría diferencial de barrido mediante rampa lineal (DSC) de la muestra SR-3 de la arcilla roja (SR)



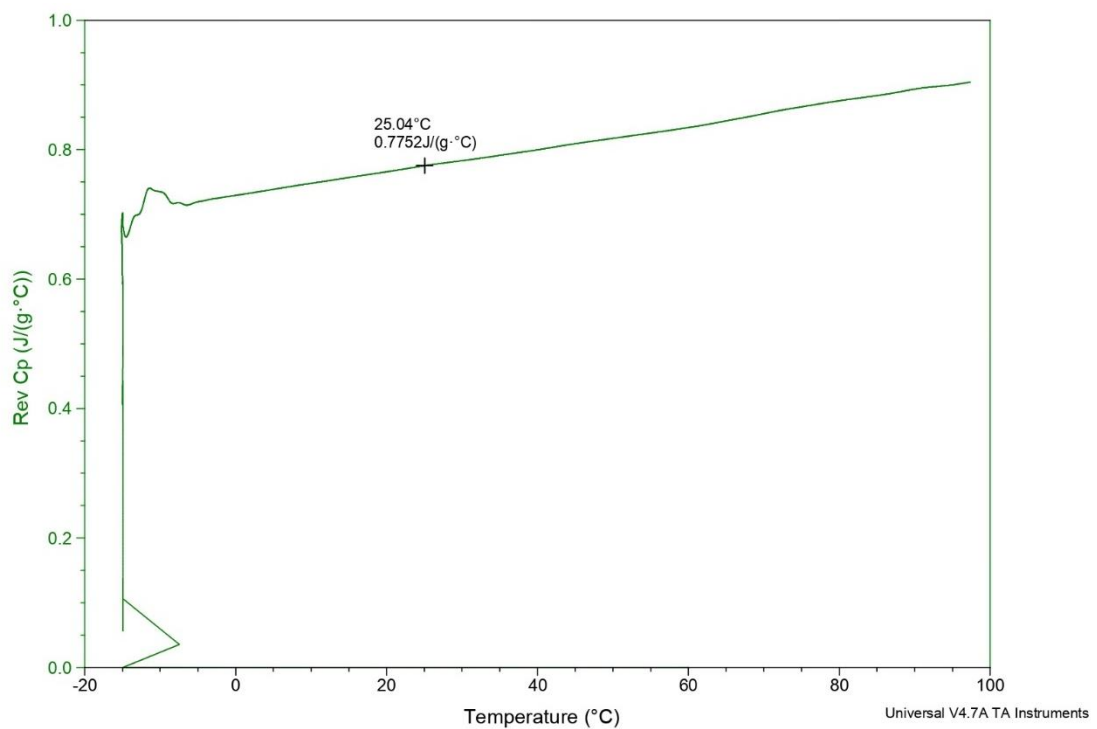
**Fig. 49.** Termograma por calorimetría diferencial de barrido mediante rampa modulada (MDSC) de la muestra SY-1 de la arcilla amarilla (SY)



**Fig. 50.** Termograma por calorimetría diferencial de barrido mediante rampa lineal (DSC) de la muestra SY-2 de la arcilla amarilla (SY)

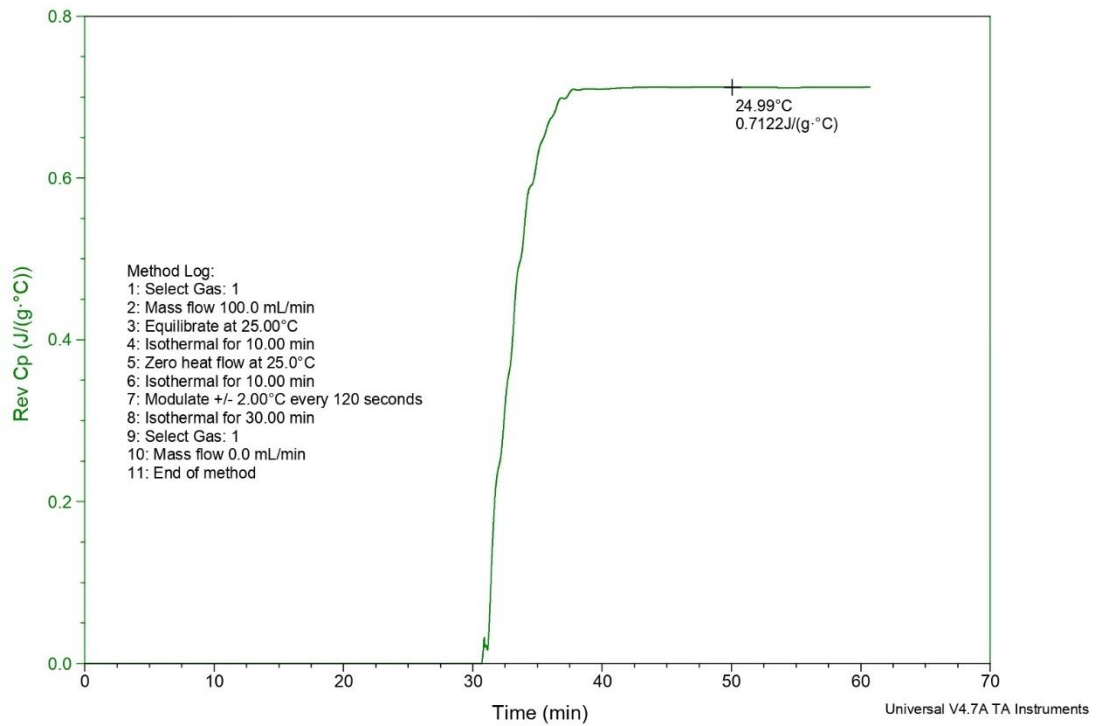


**Fig. 51.** Termograma por calorimetría diferencial de barrido mediante rampa lineal (DSC) de la muestra SY-3 de la arcilla amarilla (SY)

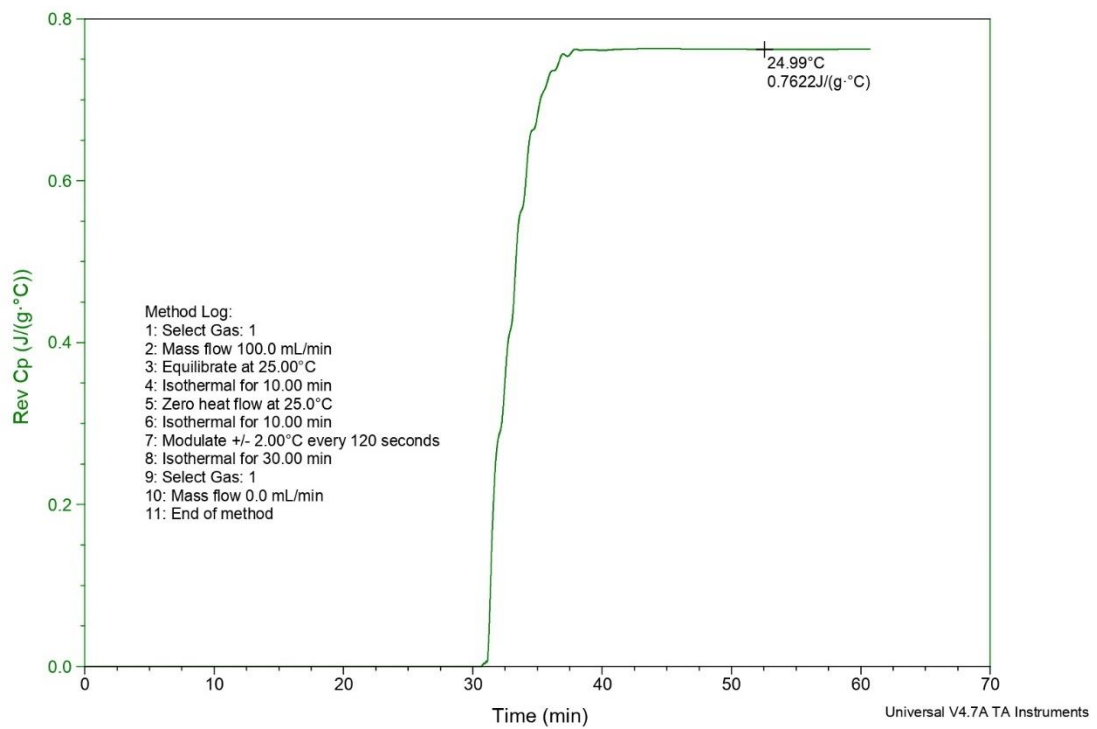




**Fig. 52.** Termograma por calorimetría diferencial de barrido mediante rampa modulada (MDSC) de la muestra SB-1 de la arcilla negra (SB)



**Fig. 53.** Termograma por calorimetría diferencial de barrido mediante rampa lineal (DSC) de la muestra SB-2 de la arcilla negra (SB)



**Fig. 54.** Termograma por calorimetría diferencial de barrido mediante rampa lineal (DSC) de la muestra SB-3 de la arcilla negra (SB)



