



**Yeso aditivado con materiales de cambio de fase para
su aplicación en rehabilitaciones energéticas en
interiores de edificios protegidos**

Autor: David Arias Arranz

Institución: Universidad Politécnica de Madrid

Resumen

Uno de los materiales ampliamente empleados en edificación es el yeso y sus derivados, tanto para usos en obra nueva como en rehabilitación. La actual situación del mercado constructivo hace que la principal línea de trabajo se centre en la rehabilitación, pero no debemos ver esta como una simple conservación del inmueble, sino como una oportunidad de mejora sustancial en el edificio.

Este uso generalizado del yeso hace que sea muy interesante su estudio desde distintos y diferentes puntos de vista. En el caso del presente proyecto fin de master se pretende valorar el cumplimiento de los distintos aspectos técnicos que debe cumplir el yeso aditivado con materiales de cambio de fase para su aplicación como revestimiento. Con el uso de esta adición se pretende conseguir una mejora térmica sustancial, así como unos resultados mecánicos y acústicos que mejoren el tradicional yeso y justifiquen su empleo como revestimiento, sobre todo para intervenciones en rehabilitación.

Palabras clave: Rehabilitación energética, yeso, materiales de cambio de fase, revestimientos, enlucido, guarnecido

Resumen

Uno de los materiales ampliamente empleados en edificación es el yeso y sus derivados, tanto para usos en obra nueva como en rehabilitación. La actual situación del mercado constructivo hace que la principal línea de trabajo se centre en la rehabilitación, pero no debemos ver esta como una simple conservación del inmueble, sino como una oportunidad de mejora sustancial en el edificio.

Este uso generalizado del yeso hace que sea muy interesante su estudio desde distintos y diferentes puntos de vista. En el caso del presente artículo se pretende valorar el cumplimiento de los distintos aspectos técnicos que debe cumplir el yeso aditivado con materiales de cambio de fase para su aplicación como revestimiento. Con el uso de esta adición se pretende conseguir una mejora térmica sustancial, así como unos resultados mecánicos y acústicos que mejoren el tradicional yeso y justifiquen su empleo como revestimiento, sobretodo para intervenciones en rehabilitación, y más concretamente en edificaciones protegidas arquitectónicamente.

Abstract

One of the materials widely used in construction is the plaster and its derivatives, both for use in new and in rehabilitation work. The current situation of the construction market makes that the principal line of work focuses on rehabilitation, but we should not see this as a simple conservation of the property, but as an opportunity for substantial improvement in the building.

This widespread use of gypsum makes very interesting study from various and different points of view. In the case of the present article, intends to assess compliance with the different technical aspects that must comply with the gypsum additive with change phase for use as coating materials. With the use of this addition is intended to achieve a substantial improvement of thermal, as well as mechanical and acoustic results that improve the traditional plaster and justify its use as a coating.

Acrónimos

Para la elaboración del presente trabajo fin de master se usarán los siguientes acrónimos referidos a los conceptos empleados en el mismo:

λ	Coefficiente de Conductividad Térmica
A/Y	Relación Agua/Yeso
PCM	Material/es de cambio de fase
Y	Yeso (Escayola E30)
A	Agua
F	Fibra de polipropileno
D	Dispersión de melamina formaldehído
RD	Real Decreto
CTE	Código Técnico de la Edificación

1. INTRODUCCIÓN

El yeso en el actual siglo XXI debe seguir evolucionando y avanzando para poder continuar con la mejora de sus prestaciones para sus usos asociados, en nuestro caso la construcción. La necesidad actual de mejorar el comportamiento térmico de nuestros edificios, tanto desde el punto de vista de reducción de la demanda, como del consumo, todo ello aunado con el mayor de los respetos al medio ambiente, hace que las líneas de investigación y desarrollo actual vayan dirigidas en esta dirección. Así existen estudios del uso del yeso con RDC, celulosa, pizarra, etc, todo ellos basados en una reutilización de materiales y aprovechamiento máximo de estos.

Otra vía para conseguir un nuevo material basado en el yeso, es la de incorporar nuevas tecnologías, como es el caso que vamos a desarrollar en el presente artículo, mediante el análisis de la incorporación de material de cambio de fase, estudiando las condiciones mecánicas y físicas bajo distintas hipótesis de trabajo para comprobar sus valores y viabilidad para su uso como revestimientos.

2. FUNDAMENTOS JUSTIFICATIVOS.

2.1. Necesidad de mejora en la eficiencia energética

La necesidad de buscar sistemas y productos que mejoren la eficiencia energética del edificio es fundamental no sólo por la sostenibilidad medioambiental y disminución de contaminantes a la atmósfera, sino también por la autosuficiencia energética, la reducción del consumo de combustibles fósiles tradicionales, y por consiguiente la sustancial reducción de gastos derivados del consumo.

Por tanto todos aquellos sistemas que permitan disminuir los consumos y en consecuencia las demandas energéticas, además de reducir la demanda exterior de energía, deben ser objeto de desarrollo y estudio.

Es por ello que los sistemas de almacenamiento de energía térmica, que nos permite adaptar los periodos y cantidades de suministro a los de demanda energética real del edificio, están siendo objeto de gran interés desde el punto de vista de la investigación ya que suponen un gran potencial para precisamente mejorar la eficiencia energética de los edificios.

En la actualidad los consumos y datos relativos tanto a estos como a demandas y emisiones nocivas, indican la insostenibilidad de la actual situación, conduciendo hacia el cambio a sistemas más eficientes.

Así, en la actualidad se confirma que desde los inicios industrial los consumos se han multiplicado por más de 100, cifra en aumento con previsiones de alrededor 2,3% anual. En el siguiente cuadro se puede observar como en 4 décadas las demandas en todos los tipos de energía se han multiplicado por 2 (1):

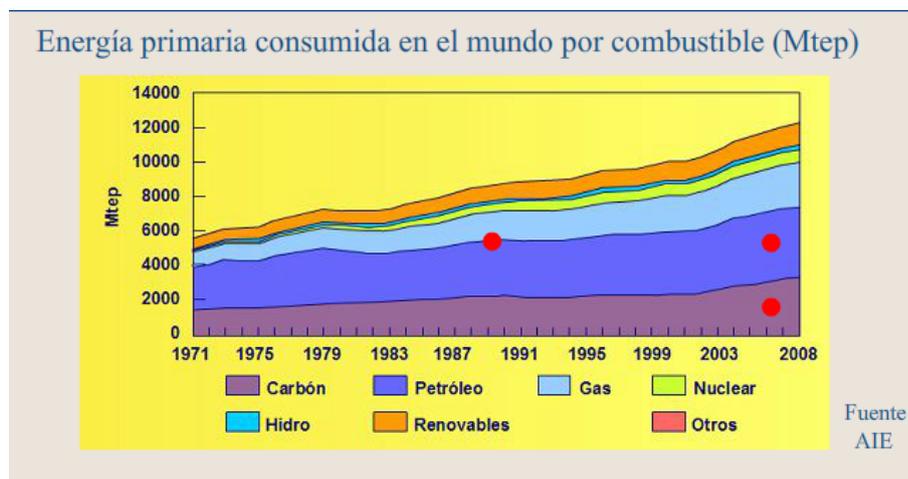


Figura 1. Energía primaria consumida en el mundo por combustible. Fuente (1)

Como se observa en el gráfico, el 80% de la energía consumida proviene de combustibles fósiles: petróleo, carbón y gas natural. Esta situación es difícilmente sostenible, no solo por la incidencia que tiene en el medio ambiente con los altos índices de emisión de CO₂ que genera, sino también por la limitada cantidad de los mismos ya que se trata de fuentes agotables.

Esta situación hace necesaria además del uso de otras fuentes de energía, de la aparición también de sistemas que mejoren la eficiencia disminuyendo así los consumos, apartado este en el que incide especialmente el uso de materiales, como el yeso, con incorporación de materiales de cambio de fase, objeto de estudio del presente trabajo. (1)

Además se ha de tener en cuenta que el 40% de consumo de energía primaria se realiza en las edificaciones, por lo que conseguir reducciones significativas en los consumos de estas debe suponer un objetivo en sí mismo, tanto en la edificación existente como en la futura a construir.

2.2. Posibilidad de acondicionamiento pasivo en rehabilitación

Las intervenciones en rehabilitación deben buscar formas de intervenir en el acondicionamiento pasivo reduciendo la demanda energética del edificio, es decir conseguir un ahorro energético, que no solo permite reducir gastos, sino que también permita limitar el uso de los combustibles fósiles tradicionales.

Para la intervención en edificios existentes, el mayor condicionante es el edificio per se, ya que se debe intervenir sobre lo actualmente existente. Es por ello que sistemas de almacenamiento de energía térmica que puedan implantarse en el edificio constituyen un gran potencial para la mejora de la eficiencia energética.

Se puede agrupar en dos líneas las aplicaciones pasivas relacionadas con el ahorro energético:

- Acumulación de los excedentes térmicos y energías renovables (solar, eólica,...), tanto para calefacción como refrigeración, para que sean almacenados gratuitamente para su posterior uso en el momento necesario de demanda, diferido al de suministro.
- Disminución y racionalización de la demanda eléctrica evitando los consumos pico, a través de:
 - Optimización de rendimientos y eficacia de los sistemas de cogeneración de electricidad, (mediante bombas de calor, que son más eficientes) haciendo coincidir la demanda de calor-frío con la demanda eléctrica.
 - Uso efectivo del calor excedente procedente de procesos de combustión y otros procesos industriales.

El caso a analizar es el almacenamiento térmico en el yeso con la ayuda de PCM. Las publicaciones relacionadas precisamente con este aspecto, almacenamiento o acumulación térmica, que hacen referencia a materiales de cambio de fase tiene cada vez más incidencia, así el número de publicaciones relacionadas con estos materiales es cada vez mayor.

En el marco internacional uno de los grupos de trabajo más organizados es el "Implementing Agreement on Energy Conservation Through Energy Storage (IEA-ECES IA)" perteneciente a la Agencia Internacional de la Energía, que supone el marco que facilita la iniciación de proyectos, realización y monitorización de los mismos, su análisis y revisión, para unir esfuerzos de colaboración entre distintos países desde el año 1978. Los países participantes en IEA-ECES IA son: Alemania, Bélgica, Canadá, Dinamarca, España, Estados Unidos, Finlandia, Italia, Japón, Países Bajos, Reino Unido, Suecia y Turquía. (2)

Desde el punto de vista del almacenamiento, y como solución constructiva aplicada interiormente a la rehabilitación, la solución de aplicaciones de yeso aditivados con productos capaces de acumular en forma de calor latente y responder a las necesidades térmicas y de confort del edificio cuando sean demandadas, parece una solución viable para la mejora pasiva del edificio.

En definitiva desarrollar y extender nuevas tecnologías que consigan reducir la demanda energética y usar de forma eficiente la energía disponible debe ser un reto del presente.

2.3. Acumulación térmica por calor latente

Recordemos que el calor latente se refiere a la cantidad de calor que necesita una sustancia para pasar del estado sólido al líquido o entre el líquido y el gaseoso, en cualquier caso cambiando su estructura molecular, y por tanto esta cantidad de calor vendrá dada por una temperatura necesaria distinta en cada material.

Por tanto el calor latente es la cantidad de energía que se guarda en un material cuando cambia su estructura molecular, su fase o su estado de hidratación.

Esta forma de almacenamiento posee grandes ventajas frente a las otras:

- Gran densidad de almacenamiento —muy superior a la de calor sensible y similar a la de las reacciones termoquímicas—, por lo que se elimina la necesidad de construcción de grandes instalaciones.
- Reducción de las pérdidas energéticas derivadas de la variación de temperatura (necesaria en la forma de almacenamiento por calor sensible).
- Posibilidad de selección de la temperatura de trabajo (proceso de carga y descarga energética del material) según las necesidades.
- Los cambios de estado se producen a temperatura constante.
- La energía acumulada por este sistema es muy superior a la acumulada por calor sensible: 125-209 de las parafinas, frente a los 83,6 del agua.

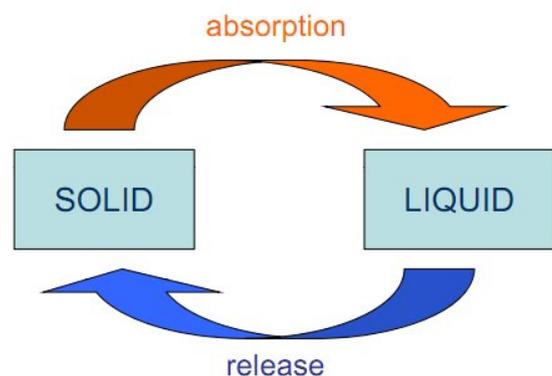
Además de los indicados cambios de fase, sólido-líquido y líquido-gas, también podría darse un cambio en la estructura sólida pasando de estructura cristalina a amorfa; o entre la cantidad de agua absorbida en un material. (7)

Como el volumen del material aumenta mucho más al pasar del líquido a gaseoso, la transición líquido/gaseoso no se usa normalmente para almacenamiento térmico latente. La teoría cinético-molecular explica el comportamiento de la materia, sus cambios de estado y el porqué se libera o se absorbe energía en estos procesos de cambio de estado molecular sólido-líquido y líquido-gas.

Resulta interesante la transformación de una fase líquida a una fase sólida o viceversa. Tanto la fase sólida como la líquida están caracterizadas por la presencia de fuerzas de cohesión debidas a la cercanía entre los átomos que las componen. En la fase sólida las moléculas vibran alrededor de posiciones fijas de equilibrio, mientras que en la fase líquida estas moléculas deben permanecer entre estas posiciones de equilibrio. La manifestación macroscópica de esta energía de vibración es lo que conocemos como energía térmica, la medida de la cual es la temperatura.

Claramente se ve que los átomos en la fase líquida son más energéticos que en la fase sólida; así pues, antes de que un sólido funda deberá adquirir una cierta cantidad de energía para superar las fuerzas de cohesión que mantienen la estructura de sólido. Esta energía es la conocida como calor latente de cambio de fase del material y representa la diferencia de energía térmica (entalpía) entre las fases líquida y sólida. Esta claro que para la solidificación de un líquido se requerirá la cesión de este calor latente y la estructuración de los átomos en sus posiciones de estabilidad (7).

Cuando existe un gradiente de temperatura en el interior de un sistema hay una transferencia de energía. En el caso del cambio de estado sólido-líquido de un material puro o de un eutéctico el cambio libera o cede energía en la zona de cambio de estado. La ventaja que reside en este hecho es que se puede almacenar grandes cantidades de



energía térmica en masas relativamente pequeñas y con pequeñas variaciones de temperatura.

La acumulación de energía térmica por calor latente ha aportado una importante solución a la "deficiencia" de las energías renovables, debido a su dependencia de las condiciones meteorológicas. Por ejemplo, la energía solar, intermitente por naturaleza, en muchas ocasiones no puede satisfacer la demanda. Entonces, se puede emplear una sustancia que absorba la energía solar y cambie de fase.

Al cambiar de fase la sustancia conserva en forma latente la energía absorbida y esta será cedida posteriormente cuando la sustancia regrese a su estado original.

Aunque el calor latente es una característica de todos los materiales, si nos referimos a sustancias con un elevado valor del mismo (adecuadas para el almacenamiento de energía) encontramos a los denominados Materiales de Cambio de Fase o PCM de sus siglas en inglés, Phase Change Materials.

Estos materiales que serán vistos en apartados siguientes, son una alternativa eficaz para el almacenamiento térmico y resultan de gran interés en diferentes áreas industriales:

- Almacenamiento y transporte de energía térmica.
- Refrigeración y transporte de productos alimentarios, farmacéuticos o médicos.
- Industria textil.
- Protección térmica de componentes y circuitos electrónicos.
- Climatización pasiva.
- Aislamiento de edificios (construcción bioclimática).

Pero no solo el sector industrial se puede beneficiar del calor latente de estos productos, sino que también la edificación puede resultar beneficiaria al incorporar los mismos a distintos productos y sistemas de construcción. Es por ello que se pretende estudiar en el presente trabajo la viabilidad de aplicación de PCM como adición al yeso para su aplicación como revestimiento.

2.3.1. Conclusiones acumulación térmica

Una vez identificados todos los sistemas existentes para almacenamiento energético, este trabajo fin de master se centra en la forma de almacenamiento térmico mediante calor latente con materiales de cambio de fase. Se aditiva este material, PCM, al yeso objeto del estudio y sobre las mezclas realizadas se estudiará la viabilidad de aplicación como revestimiento.

La elección de los PCM es porque ofrecen una serie de ventajas respecto a otros sistemas para su uso en edificación, como son:

- Su elevada densidad de almacenamiento energético –especialmente en estrechos rangos de temperatura-, muy superior a la forma de calor sensible (salvo el hielo,

cuya capacidad es similar incluso superior a algunas sales) ya que toda la energía se utiliza para el cambio de estado.

- Al no aumentar la temperatura con el almacenamiento energético, tampoco aumentan las pérdidas energéticas derivadas de ello que se mantienen en un nivel razonable durante el proceso de carga y descarga de energía.
- No requiere la ejecución de grandes instalaciones, ni el desarrollo de grandes infraestructuras para su aplicación en la edificación.
- La temperatura de trabajo necesaria (proceso de carga y descarga energética del material), se puede seleccionar dentro del rango de temperaturas utilizado en edificación (20 -30 °C). Se evitan así variaciones de temperatura fuera del rango de confort. En contraposición la forma de almacenamiento térmico mediante reacciones químicas, de elevada densidad de almacenamiento, tienen una temperatura de trabajo superior a los 100 °C, que obliga a incorporarlas como parte de sistemas activos.

Además de estos se añade unas conclusiones más al uso de estos microencapsulados de PCM:

- La microencapsulación de PCM, tanto en la construcción introduciéndolos en morteros o en aislamientos, como en la climatización incorporándolos al agua o fluidos secundarios, presenta muchas posibilidades en el aumento de la eficiencia energética del edificio, tanto en la obra nueva como en las intervenciones de rehabilitación.
- El empleo del calor latente de los PCM, se presenta como una alternativa para el ahorro y la eficiencia energética para las energías renovables, ante la posibilidad de eliminar la dependencia climatológica y así poseer un mejor dominio de la demanda.
- Además la acumulación de calor empleando PCM reduce espacio, permite desfasar las cargas de producción y aprovechar las tarifas eléctricas.
- También la cogeneración junto a la acumulación de calor, puede ser un nuevo sistema rentable en gran número de aplicaciones, aunque más en el ámbito industrial que en el de edificación.

3. MATERIAL DE CAMBIO DE FASE

3.1. Introducción y antecedentes

Los materiales de cambio de fase, más conocidos por sus siglas en inglés PCM que usaremos para referirnos al mismo en el presente trabajo, como se ha venido haciendo, son una de las más eficientes formas de acumulación térmica por calor latente, tal y como se ha indicado en el apartado anterior.

Probablemente el material de cambio de fase mas conocido y utilizado es el hielo, que a 0°C, y siéndole aplicada energía en forma de calor, pasa del estado sólido a líquido sin variar la temperatura, siendo este proceso reversible, es decir al aplicarle frío o más correctamente restarle energía calorífica, vuelve a pasar a estado sólido manteniendo la misma temperatura.

El uso de PCM se remonta al primer tercio del siglo pasado, donde se han diseñado y fabricado numerosos productos PCM con diferentes propiedades físicas, químicas, térmicas, etc para responder a diferentes necesidades, usos y aplicaciones que se les requerían. A continuación se detallan algunos de los hitos a este respecto:

- 1932, A.A.H. Douglas invento un aparato para almacenamiento térmico compuesto por un contenedor relleno de PCM (parafina y ácido estearico). El calor almacenado se cargaba durante el periodo valle eléctrico.
- Finales de 1948, la doctora Maria Telkes logro el primer resultado practico con PCM utilizando sales hidratadas. Para ello construyó una casa de una planta de 135 m², climatizada por ocho colectores solares en cubierta. El calor se almacenaba en cinco bidones llenos de sal de Glauber (15)
- En 1953 L. Gardenhire realizo un experimento similar en Las Cruces, Nuevo Méjico. En este caso se mezclo la sal de Glauber con borax como agente nucleador. En un experimento posterior llevado a cabo en una casa solar en Princeton, New Jersey, por R. Huley (de Curtis Wright Corp.) se añadió borax y derivado del cromo como agentes nucleador es de la Sal de Glauber para inhibirla corrosión.

Pero estos experimentos, no dieron los resultados esperados, resultando fallidos. No obstante se siguió investigando en estos materiales examinando más profundamente los PCMs y sus aplicaciones.

Posteriormente, el vehiculo lunar Rover, del Apollo 15, utilizo parafina como medio de almacenamiento térmico que funciona en tres sistemas de la misión espacial en el año 1960 (6).

3.2. Características de PCM

Estos materiales mantienen constante la temperatura durante el cambio de fase mientras que el material almacena o cede energía. Este hecho supone una mayor densidad energética en comparación con cualquier otro. Su uso esta ligado al de las energías renovables para ajustar los periodos de suministro a los de demanda.

A modo de síntesis inicial se puede decir que una PCM es aquel que experimenta un cambio de estado (sólido - líquido - gaseoso) a una temperatura determinada, usando su calor latente como acumulador térmico. Este tipo de calor es un modo de almacenamiento mucho más eficiente, ya que la cantidad de calor necesario para aumentar un grado la temperatura de un material (calor sensible) es muy inferior a la que hace falta suministrar en el caso del calor latente, que es característico de cada material.

Otro aspecto importante a los PCM es que durante el cambio de fase, mantienen la temperatura constante mientras que el material absorbe energía, ejemplo del hielo comentado en el apartado anterior. Este hecho supone una mayor densidad energética de estos materiales en comparación con cualquier otro. (14)

El almacenamiento de calor latente PCM se puede lograr a través de los siguientes cambios de estado:

- sólido-sólido
- sólido-líquido
- sólido-gas
- líquido-gas.

Pese a existir a priori todas estas posibilidades, la mayoría de ellas son inviables para aplicaciones reales en edificación, así:

- Los cambios de gas en fase líquida no son prácticos para su uso como almacenamiento térmico, debido a las grandes cantidades o altas presiones necesarias para almacenar los materiales, siempre que sea en su fase gaseosa. Las transiciones de gas-líquido tienen un calor más alto que la transformación de las transiciones sólido-líquido.
- Los cambios de fase sólido-sólido suelen ser muy lentos y tienen un calor más bajo de transformación.
- Los cambios de fase sólido-gas, volatilización, no son viables para estas aplicaciones ya que requieren de unos parámetros incompatibles con la aplicación directa o indirecta en edificación.
- En el caso de los cambios de fase sólido-líquido, es decir cuando el material alcanza su temperatura de fusión pasando de estado sólido a líquido, cuando podemos desarrollar aplicaciones para la edificación. Cuando la temperatura ambiente en torno a un material líquido cae, el PCM se solidifica, liberando su calor latente almacenado. Un gran número del PCM está disponible en cualquier rango de temperatura requerida de -5 hasta 190 °C. Dentro del gran confort humano de 20 °C a 30 °C, el PCM es muy eficaz, debido a que almacenan de 5 a 14 veces más calor por unidad de volumen de almacenamiento en los materiales convencionales, como el agua.

Por lo tanto esta última tipología de almacenamiento de calor latente, es la que mejores resultados y aplicaciones prácticas facilita a la hora de su aplicación en soluciones constructivas

3.3. Tipos de PCM

Como ya hemos indicado, de entre los posibles cambios de fase, el más interesante es el de sólido a líquido, ya que aunque la cantidad de energía almacenada es inferior que entre otros cambios de estado (sólido-gas), la variación de volumen es menor.

Los materiales de cambio de fase líquido-sólido más comunes en el rango de temperaturas 20 °C y 80 °C son las ceras de parafina, sales hidratadas, mezclas eutécticas y ácidos grasos.

En la Figura 1 se representa la clasificación de las sustancias usadas para almacenamiento térmico, según Abhat (15), (16)

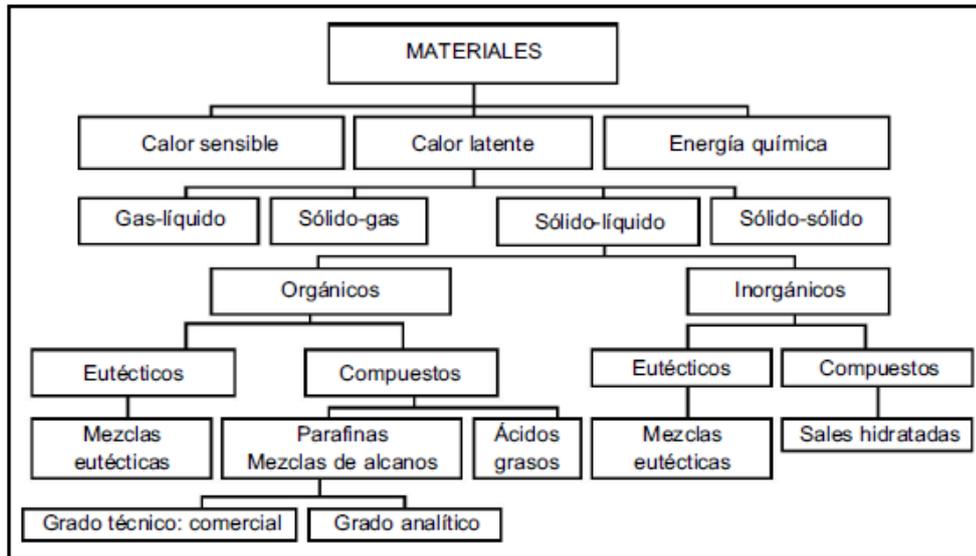


Figura 1: Clasificación y selección de materiales de cambio de fase según sus características para su aplicación en sistemas de almacenamiento de energía térmica. (16)

Como se puede apreciar en la penúltima fila de la figura, se aprecian los siguientes productos o materiales de cambio de fase de sólido-líquido:

- Mezclas eutécticas.
- Las ceras de parafina
- Los Ácidos grasos
- Las sales hidratadas

Entrando a valorar cada una de ellas por separado, se verifica que, las ceras de parafina están disponibles en el mercado, pero su calor latente (hasta 200 kJ/kg.) es solo la mitad del de las sales hidratadas (14)

Las sales hidratadas son mas baratas que las ceras de parafina y también están disponibles en el mercado, pero tienen algunas desventajas como las bajas temperaturas de fusión o la corrosión en contacto con metales (6).

En las mezclas eutécticas intervienen dos componentes con punto de fusión (solidificación) más bajo que el que poseen los compuestos individualmente. Esto hace que la mezcla alcance el punto de congelación mas bajo posible y ambos se solidifiquen a esa temperatura eutéctica.

Los ácidos grasos tienen, al igual que las ceras de parafina, un calor latente de aproximadamente 200 kJ/kg, pero son mas caros. Abhat y Himran (15) (16) muestran una evaluación global muy buena de los diversos materiales de cambio de fase.

En particular, los compuestos orgánicos, en contraposición a los inorgánicos (16), no presentan problemas de subenfriamiento y son más estables. Los materiales orgánicos, especialmente sustancias como las ceras, grasas y sus esteres, han sido recomendados como acumuladores.

Su calor latente de fusión, densidad, conductividad térmica y calor específico se encuentran en el orden de 120 kJ/kg, 800 kg/m³, 0,20 W/m°C y 1500 J/kg°C, respectivamente.

En la Figura 2 se representan los datos térmicos más representativos —temperatura de fusión y entalpía— de las familias químicas de materiales de cambio de fase.

Para profundizar en los materiales de cambio de fase indicados se puede consultar la publicación de Alicia Oliver en su artículo "Clasificación y selección de materiales de cambio de fase según sus características para su aplicación en sistemas de almacenamiento de energía térmica".

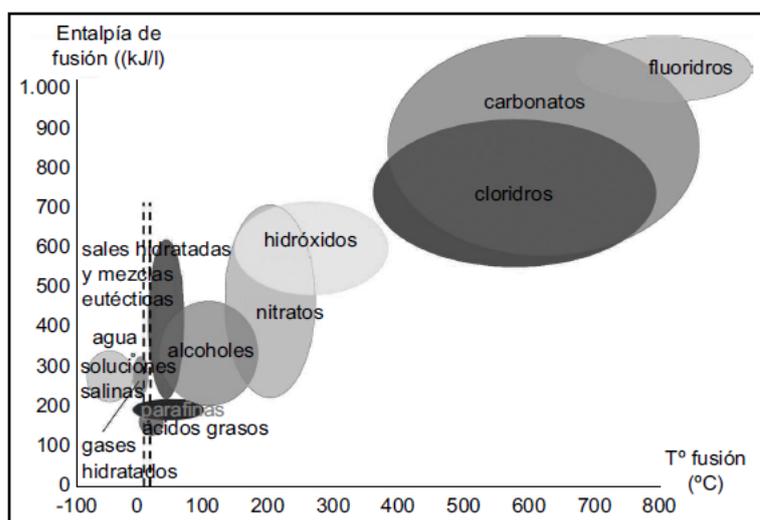


Figura 2: Muestra la relación entre temperatura y calor de fusión para los PCM disponibles. (16)

3.4. Aplicación de PCM a Edificación

En el campo de la edificación, se han desarrollado sistemas de climatización por suelo radiante, y enfriamiento pasivo en oficinas y otros edificios, utilizando sistemas de almacenamiento energético con materiales de cambio de fase. Y la utilización de la refrigeración nocturna para la refrigeración diurna, se ha demostrado en varios países.

La empresa química BASF, comercializa desde hace años un panel de yeso laminado con material de cambio de fase incorporado.

Una forma interesante de integración arquitectónica es la utilizada en la propuesta presentada por la UPM para el concurso Solar Decathlon 2005, donde el PCM se instalaba bajo el pavimento técnico para acondicionamiento pasivo de la vivienda.

Lo que en el presente trabajo se pretende estudiar es la viabilidad del uso de este material como adición a la pasta de yeso, para conseguir revestimientos con una función térmica importante en la composición de los cerramientos, de modo que puedan ser empleados como mejora pasiva térmica en la rehabilitación de edificios.

3.5. PCM comercializado aplicado a yeso: micronal de BASF

El producto permite controlar la temperatura del interior de los edificios, proporcionando un equilibrio térmico. Se trata de microcápsulas que tienen un núcleo de cera que actúa como acumulador de calor latente.

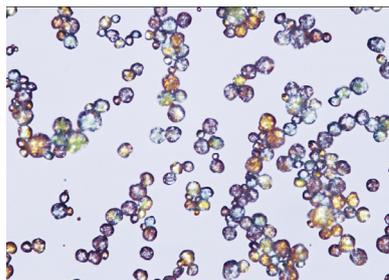


Figura 3 Parafina microencapsulada.

Fuente: web oficial de BASF (ref. enlaces interés micronal)

Si la temperatura de una habitación se eleva por encima de la temperatura de cambio de fase, que se especifica durante su fabricación, la cera se funde dentro de las microcápsulas y absorbe el exceso de calor.



*Figura 4, aspecto de micronal
Fuente: propia*



*Figura 5, Aspecto de micronal, gran necesidad volumétrica de producto por su baja densidad
Fuente: propia*

Si la temperatura baja, la cera se solidifica y las cápsulas liberan su calor a la habitación. Durante los cambios de fase la temperatura de la habitación se mantiene constante, haciendo innecesario el empleo de sistemas de aire acondicionado o calefacción. La ventaja de los acumuladores térmicos con cambio de fase Micronal PCM es que, con poco peso y espacio, disponen de una elevada capacidad de acumulación térmica. Gracias a la cera del interior de las microcápsulas, se consigue controlar la temperatura interior de edificios o viviendas. Los materiales habituales en la construcción se convierten en el soporte para este aditivo. Además, dadas sus características de versatilidad formal, se pueden aplicar en casi cualquier solución constructiva.

Como se observa en la figura 4 la textura del micronal es similar a un polvo de muy baja densidad, de entorno $0,39 \text{ gr/cm}^3$ muy inferior al yeso, que tal y como se ha comprobado en los ensayos de laboratorio, disminuye enormemente la trabajabilidad del producto final.

Micronal® PCM de BASF son esferas microscópicamente pequeñas de polímero que contienen un medio de almacenaje de cera en sus núcleos y que, con su incorporación a placas de emplaste o yeso, se derriten y solidifican para regular la temperatura ambiente, ofreciendo así un ahorro de energía para la refrigeración y un gran confort en verano.(18)

Un estudio del Passiv Haus Institut de Darmstadt, Alemania, muestra el efecto de las placas de cartón-yeso de 1,5 cm de grosor (Micronal® PCM SmartBoard™ de BASF con 26% de material de cambio de fase Micronal®) en la demanda de energía, tanto en invierno como en verano, y en las emisiones de CO₂ del mismo edificio de oficinas bajo diferentes condiciones climáticas.

Como parte de un concepto de refrigeración pasiva, el Micronal® PCM SmartBoard™ o los yesos que contienen Micronal® PCM pueden sustituir completamente los sistemas de refrigeración activos. Esto conduce no solamente a ahorros de energía, sino también a una reducción de los gastos de reparación y mantenimiento de los sistemas de refrigeración activos, que normalmente tienen un ciclo de vida medio de aprox. 15 años. (20).

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivos generales

Uno de los principales retos del presente es conseguir sistemas más eficientes a los actualmente ejecutados, que permitan la construcción de edificaciones más sostenibles, no solo desde el punto de vista puramente medioambiental, sino también desde el aspecto económico que intrínsecamente lleva aparejado.

El empleo de materiales que permitan un uso eficaz de la energía, disminuyan los consumos y por consiguiente contaminen menos, es no solo un objetivo sino un deber para el presente.

Desde este punto de vista aquellos productos que supongan un ahorro significativo en consumos, permitiendo un uso eficiente no solo en el gasto de los sistemas de acondicionamiento, calefacción, refrigeración, sino también en el abastecimiento y conservación de la energía directamente absorbida por el edificio gracias a diseños pasivos, hacen que no solo se ahorre, sino que también se contamine menos.

Este es el fin del yeso con incorporación de material de cambio de fase, que en el caso de los paneles ya ensayados (19), se demuestra un ahorro sustancial en las demandas energéticas de las viviendas, pero no existe estudio sobre la viabilidad de aplicar estos materiales, PCM, al yeso para su aplicación como revestimiento. Este es el objeto del presente trabajo de investigación. En este se pretende comprobar la idoneidad técnica del empleo de los mismos, verificando el cumplimiento de especificaciones técnicas que la normativa aplicable regula para estos.

4.2. Objetivos específicos

El trabajo tiene como objetivo fundamental verificar el cumplimiento de ciertas prescripciones técnicas que la normativa de aplicación a los yesos de construcción, y que serían de aplicación para el caso de yesos con incorporación de materiales de cambio de fase.

En primer término se plantearán varias hipótesis de trabajo para observar los resultados obtenidos, detectando cual es el mejor procedimiento para conseguir revestimientos de yeso con materiales de cambio de fase incorporado.

De las hipótesis supuestas se estudiará el comportamiento térmico de aquellas que mejor cumpla el requisito de consistencia y trabajabilidad que debe tener una pasta de yeso para su aplicación como revestimiento.

5. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

Esta investigación se ha llevado a cabo en el laboratorio de materiales de construcción de la Escuela Técnico Superior de Edificación de Madrid.

5.1. Materiales a emplear para realización de ensayos

5.1.1. Yeso matriz: E-35

La escayola es un tipo de yeso con menos impurezas. Es decir, el yeso es mezcla de semihidrato beta (proceso de cocción a temperatura ambiente) y anhidrita tipo III, mientras que la escayola es un producto de cristalización homogénea, únicamente formada por semihidrato β .

Dado que no existe normativa referente a la definición de tipos de yeso y escayola en función de su composición y de sus características mecánicas, me he basado en la clasificación que establece el Pliego de Recepción de Yesos RY-85, que aunque está derogado desde octubre del 2007 por el RD, es la única normativa los clasifica.

La escayola E-30 según el pliego de recepción de yesos RY-85, cuenta con mayor pureza que la escayola E-30 y con una resistencia mínima a flexotracción de 30 kp/cm²; menos de un 7% de agua combinada, un índice de pureza del 90% y una finura de molido del 95%, con una duración máxima para pasar de estado líquido a plástico de 8 minutos, y de plástico a sólido de 10 minutos, sin aditivos reguladores de fraguado. Tiene una alta resistencia inicial.

Para las escayolas, la relación agua/yeso recomendada suele ser de 0,6, dependiendo del uso final, pero se van a utilizar relaciones superiores incluso a A/Y de 0,7 ya utilizada en (García Santos, 88) para que al añadir las parafinas microencapsuladas se mantenga la trabajabilidad del conjunto. Al usar el PCM la trabajabilidad disminuye considerablemente, por lo que se ha optado por una cantidad de agua superior como se explicará en el apartado correspondiente.

Se ha de tener en cuenta que un aumento de agua del 1% rebaja la resistencia en un 50% (con respecto a la necesaria para hidratar), pero se ha optado por esta relación A/Y para mejorar la consistencia y trabajabilidad, y comprobar así su aplicación como posible revestimiento o material para fabricación de placas de yeso

La elección de E30 se ha realizado por tratarse de un producto muy moldeable, lo que posibilita la constitución de derivados: se emplea en vaciados, fabricación de moldes y trabajos de decoración. Pero en la actualidad su mayor aplicación es la elaboración de elementos industrializados como planchas lisas, placas, molduras y rosetas para techos, así como de paneles para tabiques

Los aditivos más comunes en los yesos y las escayolas son: retardadores de fraguado, espesantes y retenedores de agua, fluidificantes, impermeabilizantes. Otros posibles agregados son: perlita expandida, vermiculita, fibra de vidrio o de celulosa.

La elección de melamina formaldehído líquida, como retardador de fraguado, y fibras cortadas de polipropileno de 18 micrones y 1,2 cm de longitud como refuerzo de la matriz.

5.1.2. Aditivos de refuerzo: fibras de polipropileno

La selección del tipo de fibra a añadir, así como sus características (longitud y grosor) como refuerzo del yeso se basa en resultados obtenidos en trabajos de investigación anteriores (García Santos A. 88). En él se estudia el comportamiento mecánico del yeso combinado con diferentes adiciones binarias poliméricas: Fibras de poliéster, acrílica y polipropileno. Éste último es el que presenta mayor carga polar. Es fácilmente dispersable y ayuda a evitar las fisuras generadas por la retracción de la escayola.

En este caso, se utilizan fibras cortadas de 12 mm de longitud, que presentan menos problemas de amontonamiento que las de 40 mm -utilizadas en (García Santos A. 88)- y 18 micrones de diámetro, esto es 0,0018 mm.

Para mejorar la adherencia física entre la fibra y el yeso se puede actuar dándole formas adecuadas a las fibras. Si bien es cierto que se produce un aumento de la adherencia, comprobándose en muchos casos que se llega al fallo del material por rotura de la fibra y no por deslizamiento, como suele ocurrir en fibras lisas, también es verdad que los costes de obtención son mayores y en muchos casos se producen dificultades en el mezclado que requieren tratamientos especiales.

5.1.3. Aditivos plastificantes: dispersión melanina formaldehído

Los yesos con plastificante tienen una mayor uniformidad en resistencia y la resistencia es generalmente un índice de las demás propiedades deseables del yeso.

La uniformidad se determina por el coeficiente de variación de los resultados de ensayos de resistencia a la compresión; cuanto más bajo sea el coeficiente, más elevada es la

uniformidad en las distintas tongadas y dentro de cada tongada. Es posible, por tanto, obtener con la misma dosificación de yeso una resistencia característica mayor con la simple adición de plastificante.

El plastificante elegido es el Rheobuild 2100, de BASF, de consistencia líquida ya que se distribuye más uniformemente disuelto en agua, que mezclado con la escayola, y por tanto su efecto es más homogéneo.

Funciona como aditivo superplastificante incoloro que actúa simultáneamente como acelerante de endurecimiento por lo que sus campos de aplicación se encuentra fundamentalmente en el hormigón arquitectónico, fabricación de hormigón de altas resistencias, preparación de morteros, industrializados de yeso y escayola. Debe añadirse en la mezcla con la última parte del agua de amasado. También puede dosificarse conjuntamente con el agua de amasado. No es recomendable adicionar sobre la masa seca de yeso, cemento y/o áridos.

5.1.4. Materiales de cambio de fase microencapsulados:

Micronal PCM de BASF

El material de cambio de fase empleado es el desarrollado por Basf, Micronal DS 5001X, que es un microencapsulado con una entalpía asociada de 110 kJ/kg y una temperatura de cambio de fase de 26°C.

Cada una de las microscópicas esferas de plástico contiene la mitad de su volumen de cera. En un ensayo cíclico de dieciséis meses, sometido a veinticuatro ciclos de temperatura día-noche al día, se ha demostrado que la vida mínima de este material es de treinta años. Sus características de almacenaje de calor permanecieron invariables a lo largo de todo el ensayo. (18).

5.1.5. Agua

Se ha utilizado el agua corriente disponible en el laboratorio de materiales de construcción de la Escuela Técnico Superior de Edificación de Madrid.

5.2. Condiciones ambientales

Las condiciones ambientales de laboratorio donde se han realizado las probetas y los diferentes ensayos son las siguientes:

Temperatura media (°C)	Humedad relativa del aire (%)
27,0	42,0

5.3. Definición de la pasta de yeso a ensayar

5.3.1. Determinación de la cantidad de agua necesaria

Para la determinación de la cantidad de agua se ha tenido muy en cuenta la cantidad de PCM a emplear. Así se han realizado tres hipótesis con distintas cantidades de PCM.

Por un lado se ha estudiado una relación fija de 0,7 como relación agua/(yeso+PCM), cambiando la cantidad de fibra y de PCM, por lo que la cantidad de agua también ha variado según cada dosificación y cantidad de PCM.

La segunda hipótesis ha fijado una cantidad constante de agua, determinando una A/Y de 1,2.

Por último, en la tercera hipótesis de trabajo se ha reducido la cantidad de PCM hasta conseguir relaciones A/Y de entorno a 0,7. Por tanto esta última hipótesis es con la que se obtiene mejor consistencia y trabajabilidad para su aplicación como revestimiento.

5.3.2. Determinación de las distintas dosificaciones de amasadas

Partiéndose de trabajos de referencia (19), se ha empezado el trabajo con el estudio de la dosificación con mejores resultados térmicos aplicados a placas de escayola, esto es, 100% Yeso-100% agua-80% PCM-3,5% fibra-4% dispersión.

Al ensayar esta dosificación con los materiales descritos en el apartado 4.1, se comprueba una trabajabilidad y consistencia extremadamente bajas, siendo casi imposible el amasado a mano e incluso en batidora. De hecho el material en el amasado mecánico quedo totalmente adherido a la pala de este dejando el recipiente totalmente limpio.

Por ello se establecen tres hipótesis de trabajo bajo el criterio inicial de mejora de trabajabilidad:

- Por un lado trabajar con amasadas de 80PCM y 3,5 de fibra bajando paulatinamente sus proporciones a 60PCM y 2,5 de fibra, aún cuando sigan teniendo una consistencia seca, ya que cuentan con valores muy inferiores a 165 ± 5 mm, para comprobar no obstante sus características mecánicas.
- Realizar una segunda hipótesis en la que solo se varia la cantidad de PCM desde 60 a 40% de la mezcla, dejando fijos el resto de parámetros y usando una cantidad fija de 2,5% de fibra y una A/Y de 1,2. Como se observará esta hipótesis cumple prácticamente los valores de consistencia que requiere la norma.
- Una tercera y última hipótesis consistente en rebajar los contenido en PCM y la relación A/Y

En la siguiente tabla se muestran las distintas hipótesis, amasadas y probetas ensayadas:

HIPÓTESIS	AMASADAS	PROBETAS	DESIGNACIÓN
Hipótesis 1	100Y+126A+80PCM+3,5F+4D	P1-P6	80PCM+3,5F
	100Y+126A+80PCM+2,5F+4D	P7-P12	80PCM+2,5F
	100Y+119A+70PCM+3,5F+4D	P13-P18	70PCM+3,5F
	100Y+119A+70PCM+2,5F+4D	P19-P24	70PCM+2,5F
	100Y+112A+60PCM+3,5F+4D	P25-P30	60PCM+3,5F
	100Y+112A+60PCM+2,5F+4D	P31-P36	60PCM+2,5F
Hipótesis 2	100Y+120A+60PCM+2,5F+4D	P1a-P6a	60PCM
	100Y+120A+50PCM+2,5F+4D	P7a-P12a	50PCM
	100Y+120A+40PCM+2,5F+4D	P13a-P18a	40PCM
Hipótesis 3	100Y+75A+15PCM+2,5F+4D	P1b-P3b	15PCM
	100Y+85A+20PCM+2,5F+4D	P4b-P6b	20PCM

Tabla 9. Determinación de dosificación de amasadas y designación

A lo largo del artículo, para referirnos a cada una de las amasadas se usará la designación indicada en los acrónimo inicialmente indicados.

6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. Determinación de la relación de agua/yeso

Para la determinación de la relación de agua-yeso se optó por empezar el estudio a partir de la dosificación estudiada y finalmente decidida como óptima en trabajos anteriores sobre placas de yeso aditivadas con PCM.

Se consideró una relación A/Y de 1, de modo que se realizó una muestra con la siguiente dosificación:

$$100Y - 100 H_2O - 80PCM - 3,3F - 4D$$

Se observó que la trabajabilidad era muy deficiente, de tal manera que no solo era tremendamente difícil amasar a mano, sino que incluso era muy complicado para la amasadora mecánica. Así, todo el material se quedó en la pala del equipo mientras que el recipiente que lo contenía totalmente limpio.

Esta situación puso de manifiesto la avidez del PCM, por lo que se decidió tener en cuenta la cantidad del mismo aplicada a la mezcla para la relación A/Y. Se fijó la relación agua con la suma de yeso y PCM en 0,7, de modo que las cantidades de agua aplicadas a cada dosificación eran superiores a la relación 1/1 ensayada inicialmente.

YESO	PCM	A/(Y+PCM)	CANTIDAD DE AGUA	Relación A/Y
100	80	0,7	126	1,26
100	70	0,7	119	1,19
100	60	0,7	112	1,12

Tabla 10. Determinación de la relación A/Y para la hipótesis 1

En la tabla se observan las cantidades de agua empleadas en las distintas cantidades de PCM empleadas en esta primera hipótesis de trabajo, todas superiores a la relación inicial $A/Y = 1$. Esta primera hipótesis pretende comprobar los valores físicos y mecánicos del producto con grandes cantidades de cambio de fase.

La segunda hipótesis de trabajo se decidió ajustar y fijar la relación A/Y en 1,2, de modo que las variaciones en la dosificación sólo se producirían en la cantidad de PCM.

En cuanto a la tercera hipótesis, que pretende reducir la relación A/Y , y en consiguiente la de PCM, por lo que se decide una cantidad de PCM que permita acercarse a relaciones de A/Y cercanas a 0,7-0,75, por eso se opta por una cantidad de PCM 15% que necesita una A/Y de 0,75 para conseguir una consistencia que permita una trabajabilidad del producto.

De este modo se decide aumentar esa relación A/Y a un 0,85 permitiendo añadir un 20% de PCM y manteniendo unos niveles de trabajabilidad.

Designación y dosificaciones de las distintas dosificaciones:

HIPÓTESIS	AMASADAS	PROBETAS	DESIGNACIÓN
Hipótesis 1	100Y+126A+80PCM+3,5F+4D	P1-P6	80PCM+3,5F
	100Y+126A+80PCM+2,5F+4D	P7-P12	80PCM+2,5F
	100Y+119A+70PCM+3,5F+4D	P13-P18	70PCM+3,5F
	100Y+119A+70PCM+2,5F+4D	P19-P24	70PCM+2,5F
	100Y+112A+60PCM+3,5F+4D	P25-P30	60PCM+3,5F
	100Y+112A+60PCM+2,5F+4D	P31-P36	60PCM+2,5F
Hipótesis 2	100Y+120A+60PCM+2,5F+4D	P1a-P6a	60PCM
	100Y+120A+50PCM+2,5F+4D	P7a-P12a	50PCM
	100Y+120A+40PCM+2,5F+4D	P13a-P18a	40PCM
Hipótesis 3	100Y+75A+15PCM+2,5F+4D	P1b-P3b	15PCM
	100Y+85A+20PCM+2,5F+4D	P4b-P6b	20PCM

Tabla 11. Relación de dosificaciones y designación

6.2. Consistencia y trabajabilidad. Mesa de sacudidas

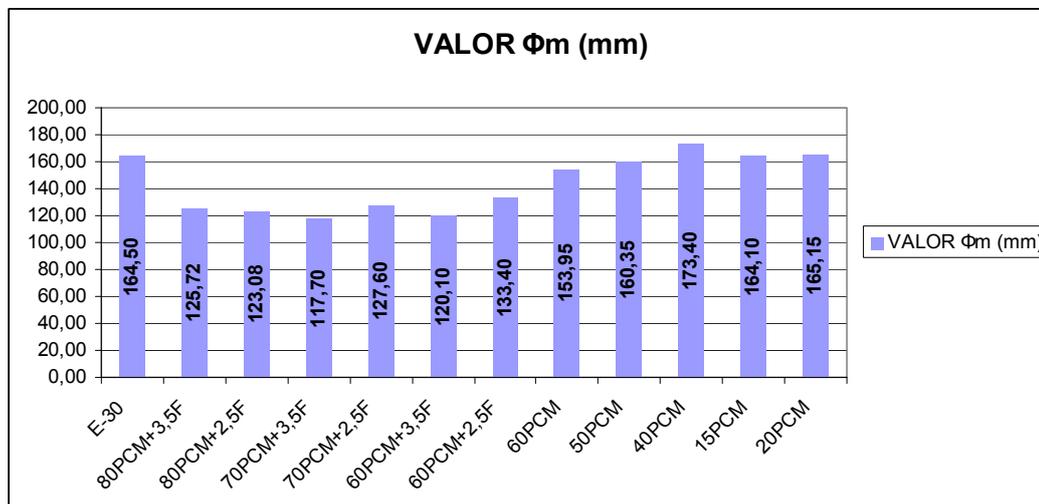


Tabla 12. Comparativa de valores de consistencia

Se observa que la consistencia más favorable de modo generalizado se da en la serie de probetas de la hipótesis 2 y de la 3.

Al reducirse de una hipótesis a otra la cantidad de PCM, y por tanto la cantidad de A/Y, la consistencia oscila en unos entornos aproximados. Si se comparan las dos probetas con valores más aproximados de ambas hipótesis, esto es, la 50PCM y la 15PCM, se observa que una reducción de un 70% en la cantidad de PCM hace disminuir un 33% la necesidad de agua para conseguir una trabajabilidad ligeramente superior.

Con la hipótesis 1 se obtienen unos valores de trabajabilidad no cercanos al $165,00 \pm 50$ que indica la norma UNE-EN 13279-2 (23)

En el caso de la hipótesis 2 los valores de consistencia son mucho mejores, aunque para ello se ha necesitado una relación de A/Y mayor de 1,2.

Por último, los valores de la tercera hipótesis de cálculo, los valores obtenidos ya se encuentran dentro de los establecidos en la UNE-EN 13279-2 (23), y la relación de A/Y se ha reducido a valores de 0,75 y 0,85, pero también la cantidad de PCM, por lo que será muy importante como ha afectado este descenso a las características térmicas del material.

6.3. Determinación del peso seco

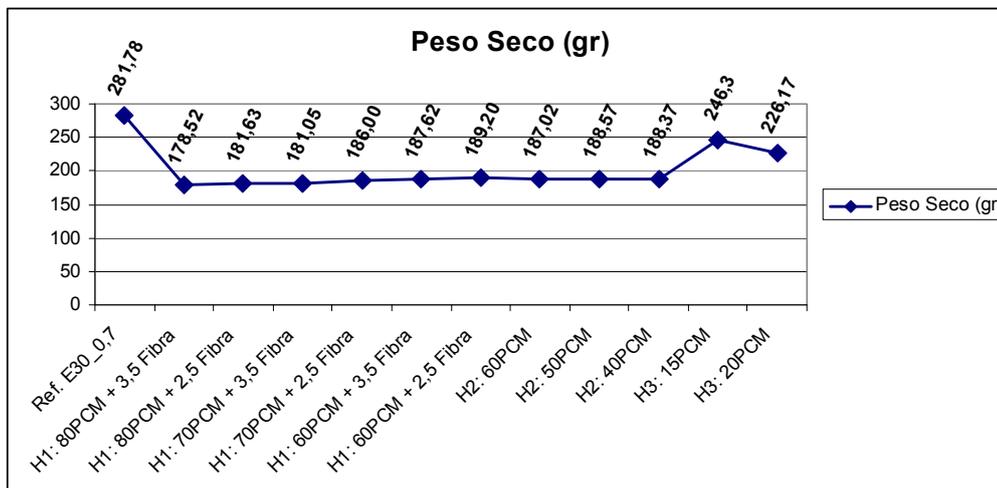


Tabla 16. Valores de pesos de las distintas hipótesis

El material PCM, con su baja densidad de $0,39 \text{ gr/cm}^3$, muy inferior al yeso que ronda los $2,3 \text{ gr/cm}^3$, aligera el producto sustancialmente entorno a un 35% en peso para cantidades de cambio de fase de 80 a 40%, y sigue siendo casi un 13% más ligero el caso más desfavorable de la hipótesis 3, y que obviamente cuenta con menor cantidad de PCM, muestra 15PCM.

Se observa que tanto los pesos iniciales como los finales de las probetas con mayor cantidad de PCM son mucho más ligeros que los de la referencia.

Un aspecto muy significativo es que las probetas aditivadas con cambio de fase sufren al pasar por la estufa reducciones de peso de hasta un 3,36%, mientras que la referencia tan solo reduce su peso en un 0,14%.

Se comprueba en las siguientes tablas que según se disminuye la cantidad de PCM también lo hace esta característica de reducción de peso.

Esta tercera hipótesis pierde por completo la característica comentada en la primera, y sufre pérdidas de peso muy similares a la referencia.

6.4. Dureza superficial Shore de la pasta endurecida

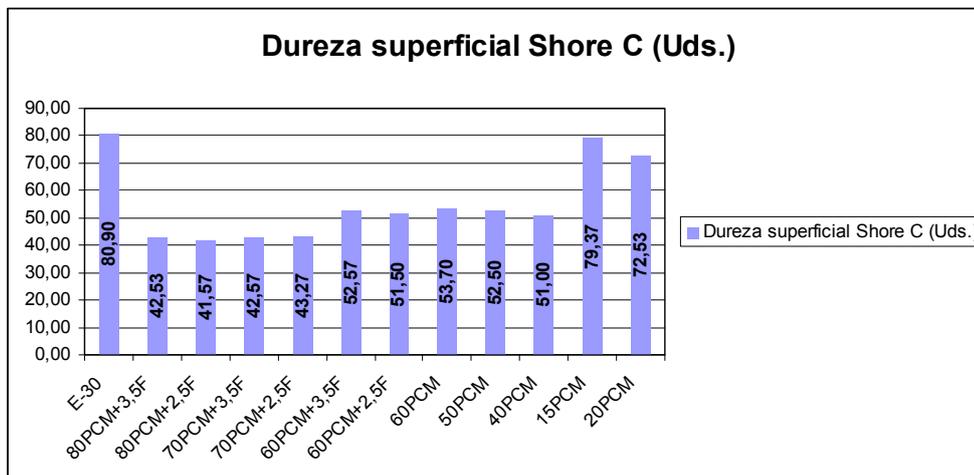


Tabla 19. Valores de dureza superficial

Al incorporar a la pasta grandes cantidades de PCM la dureza superficial disminuye a valores que superan levemente la mitad del valor de la referencia.

Se observa que la muestra de la hipótesis 2, la 60PCM, tiene una dureza superficial ligeramente mayor que su similar de la hipótesis 1, la 60PCM+2,5F, de la que solo se diferencia en la relación A/Y, siendo mayor en la hipótesis 2, 1,2 frente al 1,12 de la hipótesis 1. Es decir parece que el aumento de la relación A/Y en los casos de muestras con gran cantidad de PCM aditivado, ha favorecido el valor de dureza superficial.

Otra observación importante es que sólo una diferencia sustancial de disminución de PCM hace que se mejore la dureza superficial, ya que la única muestra que es semejante a la referencia es la 15PCM de la hipótesis 3, cuya A/Y es 0,75.

6.5. Determinación de la absorción de agua por capilaridad



Tabla 23. Valores de Absorción de agua por capilaridad

Se aprecian unos resultados muy buenos en cuanto a absorción, de tal modo que la muestra más desfavorable, la 20PCM, tiene incluso valores inferiores a la mitad de la referencia.

Durante la realización del ensayo se comprueba que la absorción es mínima, no pudiendo tomar datos en la periodicidad establecida. Se toma el dato final al retirar las probetas. Se observa, que incluso la hipótesis 3, que cuenta con la menor cantidad de PCM, sigue dotando al producto de valores muy inferiores a los de referencia.

6.6. Resultados de ensayos de resistencia a flexión

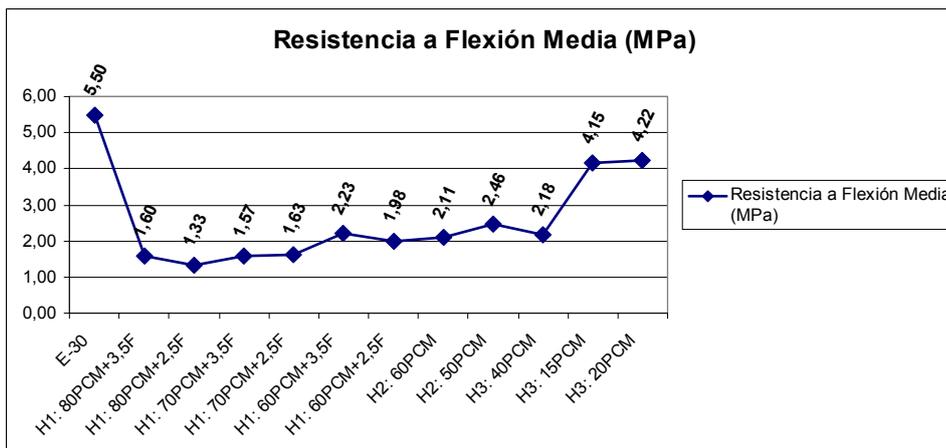


Tabla 27. Valores de resistencia a Flexión

Se observa que el PCM no aporta mejoras mecánicas a flexión al yeso, y que la referencia tiene resistencias muy superiores al producto aditivado con PCM. Pese a esto, con las resistencias obtenidas el producto podría tener diversas aplicaciones, tal y como se recoge en la UNE-EN 13279-1 (24).

6.7. Resultados de ensayos de resistencia a compresión

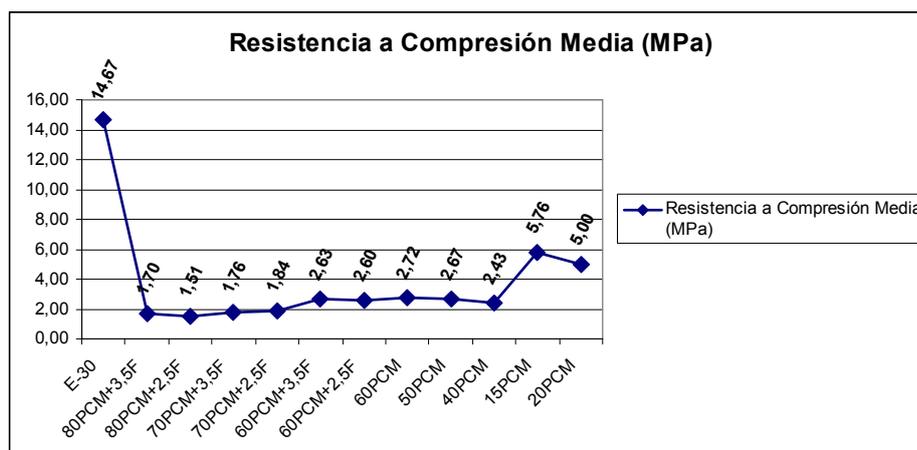


Tabla 31. Valores de resistencia a compresión

La resistencia a compresión también es muy inferior a la referencia, sobretodo en la hipótesis 1 y en concreto en las probetas con mayor PCM. En cambio, la disminución en un 81% del PCM hace que se aumente en 3,3 veces la resistencia a compresión.

6.8. Determinación de la adherencia

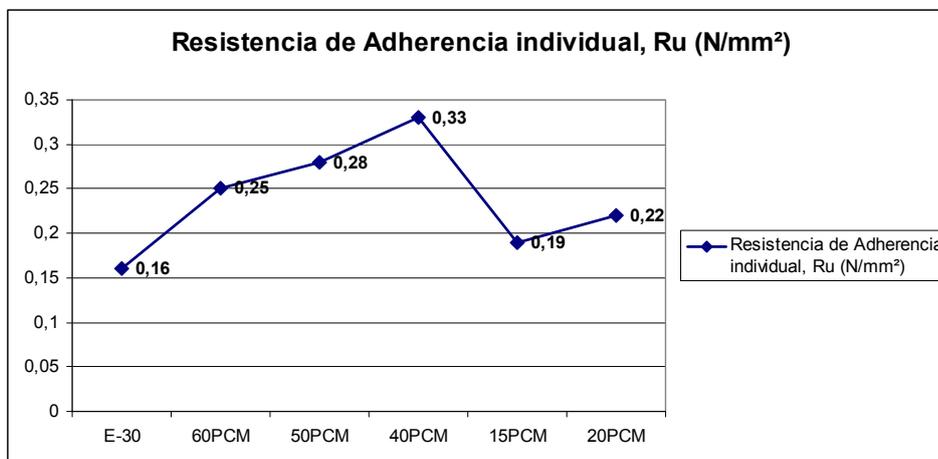


Tabla 33. Valores de resistencia a adherencia

Se ha decidido hacer el ensayo de adherencia sobre las hipótesis de trabajo que mejores datos de trabajabilidad ofrecen, y que cuentan por tanto con una viabilidad a priori mayor, para su aplicación como revestimientos.

Se aprecian unas características de adherencia muy superiores a la de referencia y además la rotura es tipo b en su mayoría, por lo que parte del material queda sólidamente ligado al soporte una vez se consigue romper la muestra.

Como se observa en la hipótesis 1, además de contar con valores altos de resistencia, la rotura se manifiesta dentro de la masa del material, por lo que el valor de la resistencia de adherencia es superior incluso a los valores indicados por el dispositivo del ensayo e indicados en estas tablas.

6.9. Ensayo térmico

PROBETA		ENSAYO EXPERIMENTAL					PROBETA λ CONOCIDO (EPS 2CM)					FLUJO DE CALOR Q (W)	PROBETA ENSAYO							
		TEMPERATURAS					T3-T4	λm (W/mK)	Área (m²)	e (m)	R (e/λ)		T2-T3	λe (W/mK)	Área (m²)	e (m)	R (e/λ)	hi (W/m²K)	he (W/m²K)	U (W/m²K)
Nº	Compuesto	T1	T2	T3	T4	T5														
1	PROBETA PCM 15	69,61	67,49	57,90	31,63	25,35	26,27	0,037	0,044	0,020	0,541	2,143	9,590	0,152	0,044	0,03	0,197	22,954	7,746	7,091
2	PROBETA PCM 20	64,99	61,27	53,65	29,89	25,44	23,77	0,037	0,044	0,020	0,541	1,939	7,615	0,173	0,044	0,03	0,173	11,812	9,892	7,810
3	PROBETA PCM 40	70,37	68,29	59,21	30,90	25,79	28,31	0,037	0,044	0,020	0,541	2,309	9,080	0,173	0,044	0,03	0,173	25,117	10,253	7,755
4	PROBETA PCM 50	68,08	65,45	55,22	30,31	26,45	24,91	0,037	0,044	0,020	0,541	2,032	10,230	0,135	0,044	0,03	0,222	17,519	11,921	6,495
5	PROBETA PCM 60	68,90	66,79	55,27	31,58	26,81	23,69	0,037	0,044	0,020	0,541	1,933	11,520	0,114	0,044	0,03	0,263	20,720	9,182	5,811

Tabla 36. Tabla de resultados del ensayo térmico

Este ensayo también se ha aplicado a las hipótesis 2 y 3, ya que como antes se ha indicado, son las que cuentan con los mejores datos de trabajabilidad, contando por tanto con una viabilidad a priori mayor, para su aplicación como revestimientos. Aplicando la metodología del ensayo antes descrito en el apartado 4.4.8, se obtienen los valores reflejados en la tabla, de modo que las temperaturas obtenidas y sobre las que se ha tomado muestras son:

- T1: interior de la caja
- T2: cara caliente probeta
- T3 cara fría probeta
- T4 exterior caja (tapa de poliestireno)
- T5 temp. Ambiente

Se muestran a continuación las tablas de los datos tomados durante el ensayo que han permitido obtener los valores medios de temperatura para poder calcular λ de las probetas.

Estos valores determinan los datos de temperatura en cada una de las muestras ensayadas en cada uno de los termopares colocados, de modo que se toma como valor para el cálculo el valor medio de los datos obtenidos, señalados al final de cada tabla.

Los resultados finales obtenidos dan valores realmente buenos para el material aditivado con PCM.

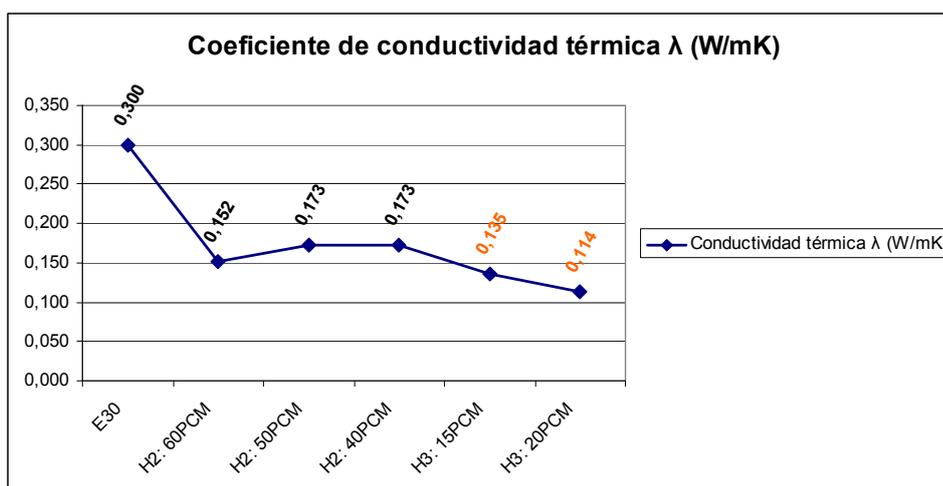


Tabla 41. Tabla de resultados del ensayo térmico y transmitancias térmicas.

La hipótesis 3, pese a contar con menor cantidad de PCM, ofrece un mejor valor de aislamiento, con un valor de λ bajo.

6.10. Ensayo acústico

Antes de iniciar el ensayo con la caja acústica, se comprueba el ruido de fondo del laboratorio, y el del interior de la caja, obteniéndose los siguientes valores:

- Ruido de fondo laboratorio: 36,5 dB
- Ruido de fondo interior caja acústica: 29,8 dB

Estos valores se comprueban antes del inicio del ensayo con cada una de las probetas de las distintas hipótesis 2 y 3.

Hay que considerar que una diferencia de 1 db no puede ni tan siquiera ser considerada al ser menor que la incertidumbre debida a la utilización de instrumentación acústica clase 1.

Los valores medidos solo pueden ser conocidos dentro de los límites de la incertidumbre experimental. El valor de la incertidumbre cuantifica la naturaleza aleatoria de los valores atribuidos a los resultados de un ensayo, de modo que da explicación al hecho de que cuando se repite una medición o ensayo y una vez estimadas y corregida la totalidad de componentes del error, el resultado obtenido no es estrictamente idéntico.

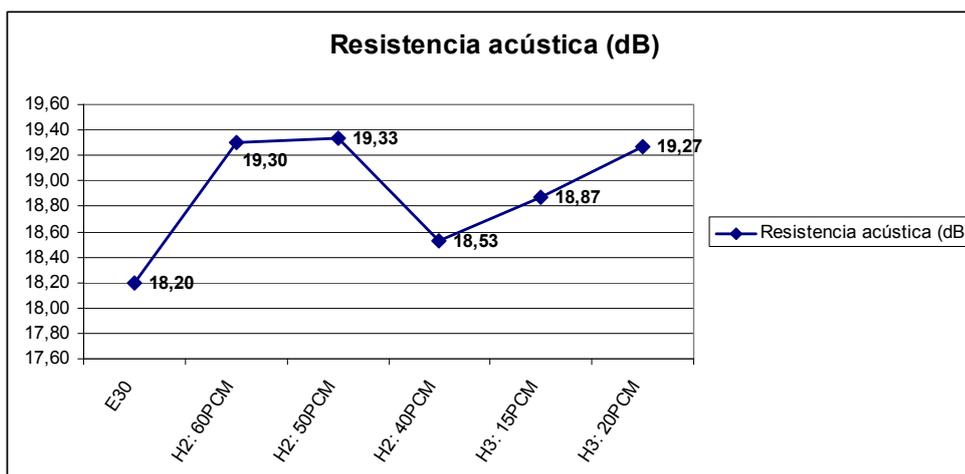


Tabla 42. Tabla de resultados del ensayo acústico.

Se observa que el mejor valor de aislamiento acústico se obtiene tanto en las muestras con mayor cantidad de PCM, como en la 20PCM que cuenta con menor relación A/Y. (25)

Los datos de aislamiento acústico se han obtenido de la siguiente toma de datos:

ENSAYO ACÚSTICO						
Amasada	Valor 1 (dB)	Valor 2 (dB)	Valor 3 (dB)	L1 (dB)	L2 (dB)	L2-L1 (dB)
60PCM	85,90	86,20	87,10	86,40	105,7	19,30
50PCM	86,40	86,50	86,20	86,37	105,7	19,33
40PCM	86,90	87,90	86,70	87,17	105,7	18,53
15PCM	86,80	87,10	86,60	86,83	105,7	18,87
20PCM	87,00	86,40	85,90	86,43	105,7	19,27

Tabla 43. Tabla de datos para ensayo acústico.

Sobre los tres valores obtenidos en cada muestra, se realiza la media L1, y se comprueba el aislamiento respecto al nivel de potencia acústica constante del habitáculo con la

fuente emisora, L2. La diferencia de ambos datos permite saber el aislamiento que aporta cada una de las muestras.

7. CONCLUSIONES

- Se observa que cuanto mayor es la cantidad de PCM aditivada al producto, mayor es la necesidad de agua, llegando a superar la relación A/Y de 1,2.
- La menor relación A/Y con la mayor cantidad de PCM, se obtiene con un 20% de este último y una relación A/Y de 0,85, para obtener unos datos que doten al producto de trabajabilidad.
- La trabajabilidad del producto disminuye mucho cuanto mayor es la cantidad de PCM y menor la relación de A/Y. Este producto muestra una gran avidez en la fase inicial de realización de probetas, de modo que al realizar la mezcla prácticamente el agua queda totalmente absorbida por la esta. Lo contrario sucede en el ensayo de absorción, cuando realmente esta es muy baja.
- El producto ensayado muestra una considerable disminución de dureza superficial cuanto mayor es el PCM incorporado, en cambio cuando la cantidad de este es ajustada, y esta acompañado de una relación A/Y menor, su dureza aumenta. Esto es lo que sucede claramente con la probeta 20 PCM de la hipótesis 3, con una dureza superficial de 72,53.
- La absorción por capilaridad es mejorada en más del 50% respecto al yeso tradicional al aditivar PCM. Cuanto mayor es el porcentaje de PCM mayor es esta mejora, que incluso llega a un 75% de reducción de absorción por capilaridad cuando se tiene un 80% de PCM. Con esta cantidad de PCM se comprueba que la absorción es mínima.
- Pese a que los ensayos a flexión y compresión muestran resultados inferiores al de referencia de E30, aún así los valores son perfectamente válidos para su uso como yeso de construcción ya que superan ampliamente los valores establecidos por la norma para su uso, 1 N/mm² para flexión y 2 N/mm² para compresión.
- Otro aspecto a destacar es la resistencia de adherencia que presentan todas las dosificaciones ensayadas, que incluso en el caso de la hipótesis 2, en su muestra 40PCM, duplica al valor de referencia del E30. Además la rotura es por cohesión casi en el 100% de las muestras. Cabe destacar también que las piezas pese a marcar un valor de rotura en el ensayo, seguían adheridas y era necesario aplicar valores mayores para conseguir el desprendimiento total de las probetas.
- Los resultados térmicos muestran unos valores realmente buenos. Incluso cuando se usen cantidades de PCM pequeñas, como es el caso de la 15PCM y del 20 PCM, estas presentan unas muy buenas características térmicas, como se comprueba con $\lambda = 0,152$ W/mk y $\lambda = 0,173$ W/mk, respectivamente. Es decir, con cantidades relativamente bajas de PCM se consiguen productos con muy buenas propiedades térmicas y relaciones A/Y de entorno 0,8.
- En cuanto al comportamiento acústico, también se aprecian mejoras incluso con los valores menores de PCM incorporado
- Tras el análisis de todos los resultados en los distintos ensayos, se puede concluir que la mejor hipótesis es la tercera, que ha utilizado una relación de A/Y muy inferior al resto de hipótesis, así como una cantidad de PCM también inferior.

Dentro de las dos dosificaciones empleadas en esta hipótesis, se observa que es la 20PCM la que mejor resultados globales arroja. Presenta una consistencia óptima para la trabajabilidad necesaria para su aplicación como revestimiento, además de contar con una dureza superficial buena, y unas características mecánicas muy superiores a las dosificaciones del resto de hipótesis, tanto en flexión como en compresión.

8. BIBLIOGRAFÍA DE REFERENCIA

- (1) Informe cátedra BP Universidad Jaume I: <http://catedrabpenergia.uji.es/observatorio/energia-en-el-mundo/>
- (2) Gonzalez, F. et al.: "Phase Change Materials (PCMs) for energy storage in architecture. Use with the Magic Box prototype". Mater. Construcc. 58(291) (2008), pp. 119-126.
- (3) Real Decreto 314/2006 por el que se aprueba el Código Técnico de Edificación.
- (4) AENOR. "UNE EN 102-039:85 Yesos y escayolas de construcción. Determinación de la dureza SHORE C y de la dureza BRINELL" (1985)
- (5) Esen M. Thermal performance of a solar-aided latent heat store used for space heating by heat pump. Sol Energy 2000;69
- (6) Ames D., the Past, Present and Future of Eutectic Salt Storage Systems, ASHRAE Journal, 31 (1989),
- (7) Himran, S., Suwono A.: "Characterization of Alkanes and Paraffin Waxes for Application as Phase Change Energy Storage Medium", 16 (1994 9 (Energy Sources),
- (8) Río Merino, M.; González Cortina, M.; Rodríguez Orejón, A.; y Otros. "Revestimientos interiores con yesos". ATEDY (2003).
- (9) VILLANUEVA DOMÍNGUEZ, Luis De, GARCÍA SANTOS, Alfonso. Manual del Yeso. Madrid: Cie Inversiones Editoriales-DOSSAT 2000, 2001. p. 268. Asociación Técnica y Empresarial del Yeso ATEDY. ISBN. 84-95312-46-8.
- (10) Arredondo, F. "Estudio de materiales II. EL yeso". Instituto de Eduardo Torroja. (1986).
- (11) VILLANUEVA DOMÍNGUEZ, Luis De. Documentación técnica de las propiedades del yeso en la construcción. Conferencia pronunciada por Luis de Villanueva Domínguez, arquitecto, Jefe de Departamento de INCE, Presidente de la Comisión Científico-técnica de la Eurogypsum en el Congreso de la Eurogypsum, celebrado en Cannes del 10 al 13 de junio de 1975. Separata del Boletín Informativo- Yeso, núm. 19. Madrid. Septiembre de 1975. Ministerio de la Vivienda - INCE. Con la colaboración de ATEDY y de S.E. EUROGYPSUM.
- (12) Asociación Técnica y Empresarial del Yeso (A.T.E.D.Y.), y el Departamento de Construcciones Arquitectónicas y su Control, de la Universidad Politécnica de Madrid. "Ejecución de los sistemas tradicionales de revestimientos de yeso". Registrado en la Universidad Politécnica de Madrid con el Nº P01 5405-138.
- (13) Santos Jiménez, Rocío. Trabajo Fin de Master de Innovación Tecnológica en Edificación. Análisis de la viabilidad del yeso con adiciones de residuo cerámico para aplicación en Edificación.

- (14) Hasan, A. and Sayigh, A. A.: "Some fatty acids as phase-change thermal energy storage materials". *Renewable energy*, 4(1) (1994), pp. 69-76.
- (15) Abhat, A.: "Low temperature latent heat thermal energy storage-Heat storage materials". *Solar Energy*, 30(4) (1983).
- (16) Abhat, A.: "Latent Heat Thermal Energy Storage in the Temperature range 20-80°C". (1978) (Bericht IKE 5-209).
- (17) Schroeder, J. and Gawron, K: "Latent heat storage". *International Journal of Energy Research*, 5 (1981), pp. 103-109.
- (18) Página web oficial de BASF: http://www.basf.es/ecp1/Spain/es/function/conversions:/publish/upload/05_News_Infocenter/03_Brochures_Reports/FOLLETO_EFICIENCIA_ENERGETICA.pdf
- (19) Tesis de A. Oliver: Integración de materiales de cambio de fase en placas de yeso reforzadas con fibras de polipropileno:
- (20) AENOR. "UNE EN 13279-2:08 Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo" (2009).
- (21) AENOR. "UNE EN 459-2:2001. Determinación de la retención de agua" (2001).
- (22) AENOR. Escayolas para la construcción. Especificaciones. UNE 102011:1986. Madrid: AENOR, 1986.
- (23) AENOR. *Reglamento Particular de la marca AENOR para yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción.*
- (24) AENOR. "UNE EN 102-039:85 Yesos y escayolas de construcción. Determinación de la dureza SHORE C y de la dureza BRINELL" (1985).
- (25) Diaz-Guerra Pérez, Jorge. Trabajo fin de Master. Influencia del soporte de la adherencia en el revestimiento continuo en base a yeso.