



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Durabilidad de morteros aditivados con PCM frente a la
agresión de agentes ambientales externos*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Miguel Ángel Sánchez González del Tánago

DIRECTORES: Miguel Ángel Álvarez Feijoo

Jorge Feijoo Conde

CURSO ACADÉMICO: 2020-2021

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Durabilidad de morteros aditivados con PCM frente a la
agresión de agentes ambientales externos*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

Universida_{de}Vigo

RESUMEN

El fomento de la mejora de la eficiencia energética en todos los campos se ha convertido en una de las principales medidas que se están implantando a nivel internacional para cumplir con las directivas ambientales.

Según el “*2019 Global Status Report for Buildings and Construction*” de la ONU, en 2018 el sector de la construcción y los edificios fueron responsables del 36% del consumo energético global y de un 39% de las emisiones de CO₂ relacionadas con la energía. Este hecho convierte al sector de la edificación en un punto clave en el que centrar los esfuerzos en materia de eficiencia energética.

En los últimos años el número de investigaciones centradas en la incorporación de PCM (materiales de cambio de fase) en diferentes elementos constructivos (suelos, techos, revestimientos de paredes) ha ido aumentando notablemente. La capacidad de los PCM para almacenar y liberar energía térmica en sus cambios de fase lo dotan de un gran potencial para el almacenamiento de energía térmica, consiguiendo suavizar las oscilaciones térmicas y manteniendo el confort dentro de los edificios, lo cual supondría una notable reducción del consumo energético y de emisiones nocivas.

El presente estudio se centra en evaluar la durabilidad de morteros de cal aditivados con PCM frente a la agresión de agentes agresivos externos (como son las sales solubles) y frente a condiciones ambientales extremas (ciclos hielo-deshielo y choque térmico) mediante ensayos de envejecimiento acelerado, para analizar su comportamiento y evaluar su idoneidad a la hora de aplicarlos en obra. También se estudia el comportamiento térmico de los morteros aditivados con PCM, así como el efecto del material en la conductividad de las muestras.

De entre los resultados obtenidos se destaca que el PCM mejora la capacidad de almacenamiento de energía térmica y reduce su conductividad térmica. Por otro lado, su incorporación al mortero influye positiva o negativamente en función del agente externo que le afecte: frente a la acción de sales solubles permite incrementar la durabilidad, no así frente al choque térmico.

PALABRAS CLAVE

Eficiencia energética, PCM, almacenamiento de energía térmica, durabilidad, morteros de cal

AGRADECIMIENTOS

El presente Trabajo de Fin de Grado pone el tan ansiado fin a esta etapa de nada menos que cinco años. Etapa en la que aparte de haber recibido una muy valiosa formación científico-técnica gracias a grandes profesionales, también me llevo enseñanzas sobre la vida que a mi juicio son, sino más, igual de importantes que la titulación en Ingeniería Mecánica.

Estos años en la Escuela Naval Militar, en los que por circunstancias de la vida, nos ha tocado vivir más momentos difíciles de los que se querrían, me han inevitablemente marcado como individuo y orientado mi manera de pensar y ver la vida, aunque este sólo sea el primer escalón de un largo camino. No obstante, aunque hayan sido más los malos que los buenos, éstos últimos serán los únicos que prevalezcan al echar la mirada atrás y los malos nos habrán inconscientemente preparado mejor para afrontar lo que nos depare la vida.

Por otro lado, no podría estar más agradecido con aquellos que me han acompañado durante el camino. Gracias a mis padres, hermanos y amigos, tanto los de siempre como los que habiéndolos conocido en esta etapa tengo la certeza de que seguirán ahí hasta el final. En especial a los AF Carrillo, Ferraz y Cervera, con los que he tenido el placer y la suerte de haber compartido camareta este último año y al AF Hertfelder, con el que he trabajado codo con codo hasta el culmen de este trabajo. Todos los anteriores me han impulsado siempre a dar lo mejor de mí y me han devuelto el ánimo cuando no lo encontraba.

Agradecer también su implicación y horas extra a mis tutores, Jorge Feijoo Conde y Miguel Ángel Álvarez Feijoo, cuya ayuda y orientación han sido imprescindibles para la realización del trabajo.

Por último, agradecer al Laboratorio de Petrofísica aplicada a la conservación del Patrimonio (encabezado por los doctores Rafael Font y Mónica Álvarez de Buergo), perteneciente al Instituto de Geociencia de Madrid (IGEO CSIC-UCM) y al programa TopHeritage por haber ayudado a la realización de este estudio financiando parte de los resultados obtenidos.

“La perseverancia hace al duro de entender inteligente y al débil fuerte”

-Leonardo da Vinci

CONTENIDO

Contenido.....	1
Índice de Figuras.....	3
Índice de Tablas.....	5
Índice de Gráficas.....	6
1 Introducción y objetivos.....	7
1.1 Contextualización.....	7
1.2 Motivación.....	10
1.3 Objetivos	10
1.4 Organización de la memoria	11
2 Estado del arte.....	13
2.1 Almacenamiento de energía térmica.....	13
2.1.1 Generalidades	13
2.1.2 Energía de calor sensible	14
2.1.3 Energía de calor latente	14
2.2 Materiales de cambio de fase (PCM).....	16
2.2.1 Generalidades	16
2.2.2 Principales características.....	17
2.2.3 Clasificación de los PCM.....	18
2.2.4 Los PCM en la edificación.....	21
2.3 Morteros de cal	24
2.3.1 Generalidades	24
2.3.2 Tipos de mortero de cal	26
2.3.3 Ventajas de los morteros de cal.....	26
2.3.4 Morteros de cal y PCM.....	27
2.3.5 Métodos de incorporación de PCM	27
3 Desarrollo del trabajo	31
3.1 Materiales.....	31
3.1.1 Mortero de cal.....	31
3.1.2 PCM.....	33
3.2 Metodología.....	34
3.2.1 Caracterización del mortero de cal	35
3.2.2 Ensayos de durabilidad.....	36
3.2.3 Análisis termogravimétrico y calorimetría de barrido diferencial.....	39

3.2.4 Análisis termográfico	41
3.2.5 Análisis de dureza superficial	41
4 Resultados	43
4.1 Caracterización del mortero de cal	43
4.2 Ensayos de durabilidad	45
4.3 Análisis termogravimétrico y calorimetría de barrido diferencial.....	52
4.4 Análisis termográfico	58
5 Conclusiones y líneas futuras.....	62
5.1 Conclusiones.....	62
5.2 Líneas futuras.....	62
6 Bibliografía.....	64
Anexo I: Cal Hidratada CL-90-S	69
Anexo II: Dimensiones de las probetas	70
Anexo III: Lista de PCM's comerciales.....	71
Anexo IV: Ficha Técnica Rubitherm RT35HC.....	72
Anexo V: Ficha Técnica FLIR i7.....	73
Anexo VI: Gráficas TG-DSC.....	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Cronograma de la importancia de los diferentes materiales según la época [1].....	7
Figura 1-2 Evolución en la forma de proporcionar confort en las viviendas [2] [3]	8
Figura 1-3 Cambios desde 2010 en suelo urbanizado, población, energía y emisiones [4]	8
Figura 1-4 Diagrama de consumo energético y emisiones según sector [4]	9
Figura 1-5 Demanda energética en los edificios según aplicación [4]	9
Figura 2-1 Formas de almacenamiento de energía térmica [14].....	14
Figura 2-2 Gráfica calor sensible y calor latente [17].....	15
Figura 2-3 Absorción y cesión de energía en el cambio de fase [16].....	16
Figura 2-4 Reseña histórica de los primeros hitos (elaboración propia basada en [18]).....	16
Figura 2-5 Clasificación según Abhat [31].....	18
Figura 2-6 Clasificación de los materiales de cambio de fase [26].....	19
Figura 2-7 Relación entre temperatura y entalpía de fusión [21].....	21
Figura 2-8 Principio de funcionamiento de los PCM en edificación [28]	22
Figura 2-9 Funcionamiento del PCM frente a variación de temperatura [17].....	22
Figura 2-10 Flujo de calor y consumo eléctrico (hormigón frente a recubrimiento con PCM) [35]	23
Figura 2-11 Ámbitos de aplicación de la cal y tipos usados en construcción [39].....	24
Figura 2-12 Ciclo de elaboración de los morteros de cal [40]	25
Figura 2-13 Ejemplo de ladrillos con PCM macro-encapsulado [51].....	28
Figura 2-14 Esquema de funcionamiento de PCM micro-encapsulado [53]	28
Figura 2-15 Imagen SEM de PCM micro-encapsulado en mortero de yeso [30].....	29
Figura 3-1 Arena de sílice utilizada.....	31
Figura 3-2 Tipos de probetas empleadas.....	33
Figura 3-3 Rubitherm RT35HC.....	33
Figura 3-4 Ciclos choque térmico	37
Figura 3-5 Inmersión en sales, secado y enfriamiento con HR del 80% (izquierda a derecha).....	38
Figura 3-6 Ciclos hielo/deshielo	38
Figura 3-7 Ensayo orientativo.....	39
Figura 3-8 Labsys Evo 1180 y ejemplo de los ciclos utilizados	39
Figura 3-9 Ejemplo de tramos que componen el ciclo.....	40
Figura 3-10 Cámara FLIR y ejemplo de imagen.....	41
Figura 3-11 Dureza superficial con durómetro PCE-2500	42
Figura 3-12 Principio físico de Equotip.....	42
Figura 4-1 Aspecto de las muestras tras 10 ciclos.....	47

Figura 4-2 Estado final de las probetas en ciclos de sales (PCM5-B, PCM10-A, PCM10-B).....	49
Figura 4-3 Patrón de rotura (PCM10-A, PCM10-B, PCM5-B y PCM0-B).....	49
Figura 4-4 Roturas de PCM10-8 y PCM0-1	51
Figura 4-5 Patrón de rotura más común en ciclos hielo/deshielo.....	51
Figura 4-6 Contraste térmico PCM10 a la intemperie	52
Figura 4-7 Disposición de las muestras (ensayo de conductividad).....	58
Figura 4-8 Imagen FLIR inicio del ensayo	59
Figura 4-9 Imagen FLIR final del ensayo.....	60
Figura A1-0-1 Ficha técnica CL-90-S [75].....	69
Figura A2-0-1 Dimensiones de las diferentes probetas.....	70
Figura A3-0-1 Lista PCM comerciales [15].....	71
Figura A4-0-1 Ficha técnica Rubitherm RT35HC.....	72
Figura A5-0-1 Ficha técnica FLIR i7	73

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Ventajas materiales orgánicos e inorgánicos (elaboración propia basada en [33]).....	20
Tabla 2-2 Desventajas materiales orgánicos e inorgánicos (elaboración propia basada en [33])...	20
Tabla 2-3 Clasificación de morteros de cal (elaboración propia basada en [39]).....	26
Tabla 2-4 Resumen de ventajas de los morteros de cal.....	26
Tabla 3-1 Proporciones de los morteros	32
Tabla 3-2 Porcentaje en agua de las muestras	32
Tabla 3-3 Tabla comparativa candidatos PCM	34
Tabla 4-1 Principales propiedades de los tres tipos de mortero (elaboración propia basado en [70])	43
Tabla 4-2 Registro de pesos en ciclos de choque térmico.....	46
Tabla 4-3 Medidas de dureza de cada muestra y media aritmética (choque térmico)	47
Tabla 4-4 Relación entre dureza y resistencia a compresión (choque térmico)	47
Tabla 4-5 Registro de pesos en ciclos de alteración por sales	48
Tabla 4-6 Medidas de dureza y media aritmética (ciclo de sales).....	49
Tabla 4-7 Relación entre dureza y resistencia a compresión (alteración por sales).....	49
Tabla 4-8 Registro de pesos en ciclos de hielo/deshielo	50
Tabla 4-9 Medidas de cada muestra y media aritmética (hielo/deshielo).....	51
Tabla 4-10 Relación entre dureza y resistencia de compresión (hielo/deshielo).....	51
Tabla 4-11 Temperaturas iniciales del ensayo	59
Tabla 4-12 Temperaturas finales del ensayo.....	60

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 4-1 Volumen poroso acumulado en función del diámetro de poro	44
Gráfica 4-2 Pérdida de masa en ciclos de choque térmico	46
Gráfica 4-3 Evolución de pesos en ciclos de alteración por sales.....	48
Gráfica 4-4 Evolución de los pesos en ciclos de hielo/deshielo	50
Gráfica 4-5 Blanco de los análisis del TG	54
Gráfica 4-6 Análisis TG-DSC mortero sin PCM.....	55
Gráfica 4-7 Análisis TG-DSC mortero con 5% PCM.....	55
Gráfica 4-8 Análisis TG-DSC mortero con 10% PCM.....	56
Gráfica 4-9 Comportamiento térmico mortero 10% PCM	57
Gráfica 4-10 Comportamiento térmico mortero 10% PCM	57
Gráfica 4-11 Temperatura de los morteros frente al tiempo.....	61
Gráfica A6-1 TG-DSC Blanco (Heatflow)	74
Gráfica A6-2 TG-DSC sin PCM (Heatflow).....	74
Gráfica A6-3 TG-DSC 5% PCM (Heatflow).....	75
Gráfica A6-4 TG-DSC 10% PCM (Heatflow).....	75

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Contextualización

A lo largo de la historia, el hombre siempre ha adaptado la edificación al medio en el que se encontraba. No obstante, y gracias a los avances tecnológicos que se producen en el siglo XX en el ámbito del desarrollo y comportamiento de diferentes tipos de materiales, parte de los cuales se pueden observar en la Figura 1-1, se deja de lado este enfoque [1].

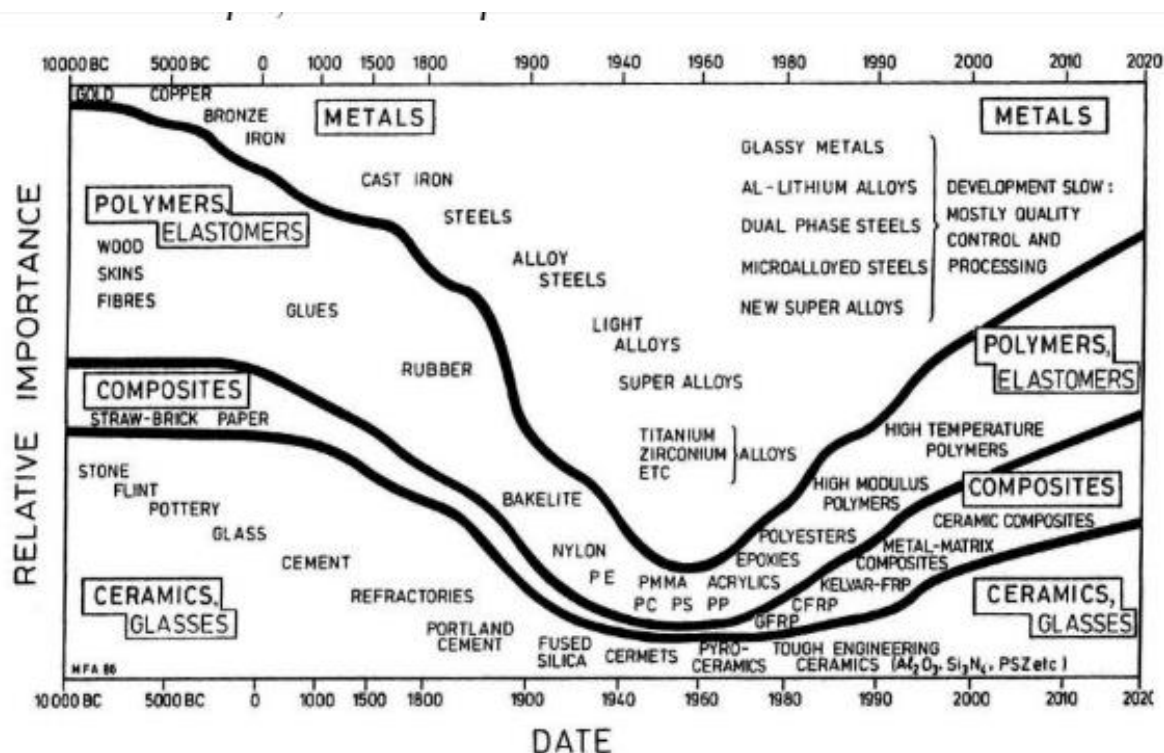


Figura 1-1 Cronograma de la importancia de los diferentes materiales según la época [1]

A partir de este periodo se empieza a edificar libremente, pudiendo hacer uso de estas nuevas tecnologías para ofrecer al usuario el confort necesario de manera artificial, en detrimento de unos limitados recursos energéticos por el notable consumo que ello conlleva. En la Figura 1-2 se puede observar un contraste de esta evolución en la manera de proporcionar confort térmico en las viviendas.



Figura 1-2 Evolución en la forma de proporcionar confort en las viviendas [2] [3]

El abuso prolongado de los recursos naturales y energéticos por parte del hombre ha ocasionado un fuerte impacto en la naturaleza. Este impacto se traduce en graves problemas medioambientales que ponen en peligro la perdurabilidad de la sociedad y su modo de vida tal y como la conocemos. Entre estos impactos se pueden destacar por su grave impacto a nivel global:

- El cambio climático ocasionado por la emisión de gases de efecto invernadero.
- La reducción de la capa de ozono debido principalmente a la emisión de clorofluorocarbonado (CFC) y óxidos de nitrógeno (NOx).
- Contaminación de agua, especialmente de las fuentes de agua potable, lo que reduce las reservas disponibles para el consumo humano.
- Disminución de recursos naturales.

En el ámbito energético, el consumo de combustibles fósiles, así como la localización de las principales reservas mundiales en determinados países, los ha convertido en recursos cada vez más escasos y difíciles de conseguir, desencadenando un considerable aumento de los precios de estos recursos energéticos.

Según el “2019 Global Status Report for Buildings and Construction” de la ONU, en 2018 el sector de la construcción y los edificios fueron responsables del 36% del consumo energético global y de un 39% de las emisiones de CO₂ relacionadas con la energía, del cual un 11% se debieron a la producción de elementos constructivos como el acero, cemento y cristal. Las emisiones en el sector de la construcción aumentaron un 2% de 2017 a 2018 llegando a un punto récord (Figura 1-3), mientras que la demanda energética aumentó un 1% desde el 2017 (7% desde 2010). Estos aumentos fueron el resultado de un notable incremento del suelo urbanizado y de la expansión de la población. A pesar de seguir haciendo progresos en eficiencia energética, éstos no fueron suficientes como para superar el aumento en demanda [4].

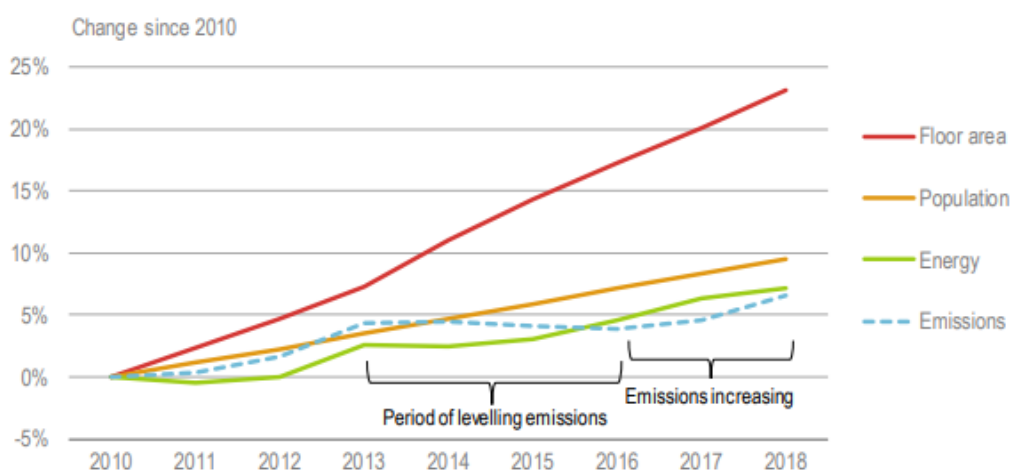


Figura 1-3 Cambios desde 2010 en suelo urbanizado, población, energía y emisiones [4]

Según los datos, tanto las emisiones como el consumo energético derivados de los edificios y el sector de la construcción están aumentando. A su vez, viendo que dichos sectores representan los mayores porcentajes en cuanto a consumo energético y gases de efecto invernadero (Figura 1-4), éstos deberían ser el objetivo principal en los esfuerzos para mejorar en sostenibilidad.

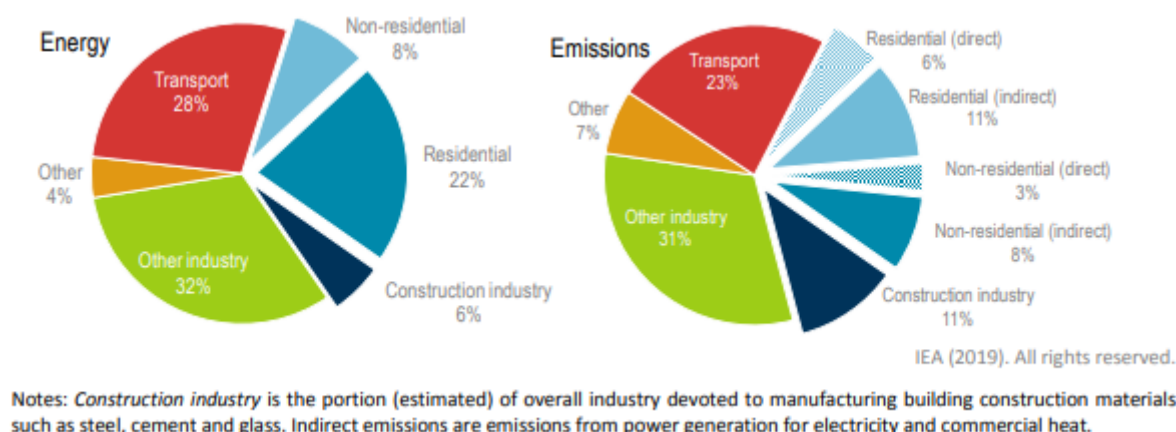


Figura 1-4 Diagrama de consumo energético y emisiones según sector [4]

A nivel global, el aumento de consumo energético principalmente derivado de un mayor consumo eléctrico desde 2010 para aire acondicionado y ACS (agua caliente sanitaria) como muestra la Figura 1-5, ha desencadenado en un aumento de emisiones. Desde dicho año, la demanda en refrigeración de espacios aumentó más de un 33%, mientras que la demanda energética para electrodomésticos aumentó un 18% y un 11% para ACS. De la misma manera, aunque la demanda derivada de la calefacción disminuyó un 1%, lleva 5 años significando un tercio de la demanda energética global de los edificios.

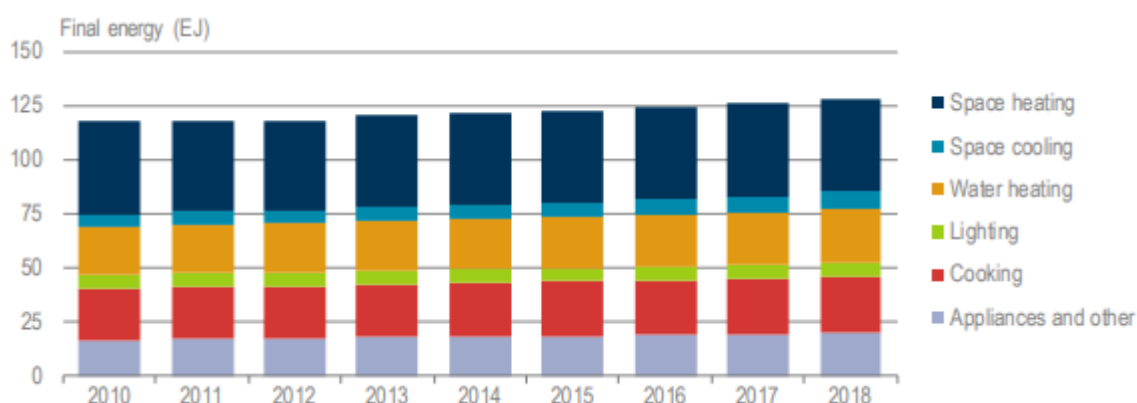


Figura 1-5 Demanda energética en los edificios según aplicación [4]

Por lo tanto y según los objetivos de la ONU, es necesaria la concentración en acciones que ayuden a mitigar las emisiones derivadas de los edificios mediante recursos energéticos renovables y bajos en carbono. A su vez, es imprescindible prestar mayor atención a elementos constructivos bajos en carbono, mejoras en los recubrimientos de los edificios y eficiencia en cuanto a los equipos y sistemas empleados. A continuación se detallan algunos de los objetivos en cuanto a energía asequible y no contaminante marcados por dicha organización [5]:

- De aquí a 2030, aumentar la cooperación internacional para facilitar el acceso a la investigación de energías limpias, incluidas las fuentes renovables, la eficiencia energética y promover la inversión en infraestructura energética.
- De aquí a 2030, duplicar la tasa mundial de mejora de la eficiencia energética.

Por lo tanto, el objetivo general que se deduce de las anteriores medidas y objetivos es la mejora de la eficiencia energética. Según la AEDENAT (Asociación Ecologista de Defensa de la Naturaleza), *“la eficiencia energética es la obtención de los mismos bienes y servicios energéticos, pero con menos energía, con la misma o mayor calidad de vida, con menos contaminación, a un precio inferior al actual, alargando la vida de los recursos”* [6]. Además, como se comenta anteriormente, la edificación es un sector clave para conseguir dichos objetivos.

Uno de los métodos de acondicionamiento pasivo en los edificios, que puede ser beneficioso para este fin, es el aprovechamiento del calor latente de los materiales de cambio de fase (PCM en inglés). Existen numerosos estudios que apuntan a estos materiales por su potencial para almacenar y liberar calor, lo que es de gran aplicación para mantener el confort térmico en las viviendas [7] [8]. Estos materiales de cambio de fase, que habían sido vagamente investigados y desarrollados hasta hace pocos años, han sido objeto de importantes inversiones en I+D+i [4]. Con ello se pretende estudiar las propiedades de elementos constructivos como los morteros de cal o cemento, como son la elevada porosidad, baja resistencia mecánica y durabilidad frente a ciclos hielo/deshielo y cristalización de sales solubles [9]. De esta manera, los PCM pueden llegar a constituir una alternativa efectiva para reducir el nivel de dependencia energética, en aras de una reducción del consumo y de las emisiones nocivas para nuestro planeta.

1.2 Motivación

La capacidad de los PCM para almacenar energía, reducir el consumo y suavizar las oscilaciones de las temperaturas interiores manteniendo un aceptable confort térmico en instalaciones parece ser un hecho. La motivación principal de este trabajo de fin de grado es seguir esta línea de investigación consistente en la adición de materiales de cambio de fase a elementos constructivos convencionales, evaluando en este caso su durabilidad frente a la agresión de agentes externos, que son su debilidad de acuerdo con sus propiedades iniciales. Todo ello con el objetivo de estudiar la posibilidad de aplicación de estos materiales especialmente en construcciones antiguas, como por ejemplo los edificios de las bases y arsenales de la Armada, a fin de mejorar la eficiencia energética de los mismos. Para ello, se pretende estudiar si la aplicación de elementos constructivos aditivados con PCM asegura que las duras condiciones a las que están expuestos (fuertes vientos, presencia de agua y sales solubles, entre otras) no afectan a la durabilidad del tratamiento en obra, ya que de afectar negativamente a las propiedades físico-mecánicas de la estructura se desaconsejaría su aplicación.

1.3 Objetivos

El objeto de este trabajo es estudiar la durabilidad de morteros de cal aditivados con materiales de cambio de fase (PCM en inglés) frente a la agresión de agentes ambientales externos. Partiendo de los PCM que se adhieren a los medios disponibles, se realizará un estudio previo en el que se basará la decisión de cual ofrece mejores propiedades, caracterizándolos según una serie de factores como la capacidad calorífica, punto de fusión, etc. Se pretende observar si la adición de PCM en un mortero puede influir en su respuesta frente a la acción alterante de agentes externos. Para ello se comparará el comportamiento de un mortero de cal sin aditivos (referencia) con dos morteros de cal que cuentan con un contenido de PCM, en peso, de un 5% y un 10% respectivamente. Estos morteros serán sometidos a los siguientes ensayos:

- Choque térmico: Este ensayo evalúa en qué medida se alteran las propiedades de los morteros al ser sometidos a cambios bruscos de temperatura.
- Ciclos de alteración por sales: Este ensayo evalúa la resistencia de los morteros frente a la acción ejercida por las sales solubles, simulando las tensiones que se producen en el interior de los poros del material frente a la cristalización-disolución de una sal determinada (en este caso una disolución de $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ al 14% en peso).

- Ciclos hielo-deshielo: En este ensayo se saturan las muestras de mortero con agua y se congelan para después, al descongelarlas, estudiar parámetros como la pérdida de peso o cambios macroscópicos, que nos permiten analizar la resistencia que ejercen las probetas del material frente a la solidificación de agua en su estructura porosa y su posterior fusión.

Los resultados permitirán analizar la influencia que tiene la adición de PCM en el comportamiento del mortero. El análisis pormenorizado de los resultados obtenidos permitirá justificar si la adición de PCM en la composición de este tipo de morteros es en efecto idóneo para su utilización en obra.

1.4 Organización de la memoria

En este apartado se pretende exponer brevemente cómo se encuentra estructurada la memoria y qué aspectos se tratarán en cada apartado:

- **Introducción y objetivos:** Este apartado está compuesto en primer lugar por una breve introducción al tema mediante su contextualización según las necesidades actuales de equilibrio energético y reducción del efecto nocivo de la sobreutilización de los combustibles fósiles tanto por su agotamiento como por las emisiones que generan. Tras ello, se explica la motivación que impulsa el presente trabajo y los objetivos que se pretenden alcanzar, centrado en el ámbito de los materiales de cambio de fase y su aporte en cuanto a durabilidad en los morteros de cal.
- **Estado del arte:** Una vez introducido, se abordan los fundamentos de los que emana el tema y se expone una visión de los principales avances realizados en este tema, concretamente del almacenamiento de energía térmica, de los materiales de cambio de fase y su aplicación en el sector de la edificación y de los morteros de cal y los métodos mediante los cuales se combinan con los PCM.
- **Desarrollo del trabajo:** Este apartado comienza con la justificación del tipo de mortero elegido, el material de cambio de fase que se utilizará como aditivo y se explica el proceso de elaboración de las probetas. A continuación, se expone la metodología seguida en cuanto a la caracterización del mortero, los ensayos de durabilidad y los distintos análisis que se llevan a cabo durante los mismos.
- **Resultados:** En este apartado se exponen los resultados más representativos de las mediciones y análisis que se realizan en el trabajo, acompañados de interpretaciones de las posibles causas de dichos resultados y lo que suponen para el presente estudio.
- **Conclusiones y líneas futuras:** En este apartado se sintetizan los resultados obtenidos en puntos clave que marquen el resultado final del presente trabajo y sean de interés para los objetivos que se pretenden alcanzar. En líneas futuras se reflejan los aspectos de interés que surgen a partir de este trabajo, así como nuevas innovaciones que se hayan planteado durante el proceso de investigación.
- **Bibliografía:** En este capítulo se recogen todos los informes, trabajos o tesis que se referencian en la memoria y que en los que se basa el trabajo.
- **Anexos:** Este apartado se compone tanto como de documentos de apoyo o ampliatorios sobre aspectos que se comentan en el presente trabajo (como son especificaciones técnicas de productos o dimensiones de las probetas) como de resultados que se extraen de los diferentes ensayos que, por su extensión, no se han introducido anteriormente.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Almacenamiento de energía térmica

2.1.1 Generalidades

El almacenamiento de energía térmica es una tecnología que se basa en el calentamiento de un medio de almacenamiento, de forma que pueda ser utilizada más adelante con ese mismo fin, calentar, enfriar o como fuente de generación de potencia [10]. Estos sistemas de almacenamiento de energía (SAE) son utilizados en mayor medida en procesos industriales y de edificación. La utilización de SAE en procesos de generación energética nos ofrece mejoras en cuanto a eficiencia, fiabilidad y reducción de costes en inversión. Además, y como punto clave, menor contaminación del medio ambiente ya que se producen menos emisiones de CO_2 [11].

El aprovechamiento de la inercia térmica de los materiales para reducir el consumo energético es una técnica que lleva siglos utilizándose. El almacenamiento térmico nos ofrece las siguientes ventajas:

- Disminución del consumo energético: Teniendo como resultado la reducción de los costes de instalación y funcionamiento de sistemas para la producción de frío y/o calor.
- Es capaz de almacenar energía proveniente de diversas fuentes: energía solar, calor humano, calor por infiltración de aire caliente, etc.

Los sistemas de almacenamiento de energía térmica presentan una posible solución a la conservación energética [12]. La demanda energética en los sectores de la edificación y la industria es dinámica y puede verse sometida a fluctuaciones periódicas. La utilización de los SAE permite paliar el margen existente entre demanda y suministro energético mediante diferentes estrategias de cambio de carga máxima, pudiendo hacer uso del calor residual/sobrante.

En todo sistema de almacenamiento se buscan densidades altas de almacenamiento energético para poder así modificar la demanda energética y favorecer el uso de energías renovables. Como se puede observar en la Figura 2-1, existen tres métodos para almacenar energía térmica: calor sensible, calor latente y almacenamiento termoquímico.

Las reacciones termoquímicas tienen una capacidad muy elevada de almacenamiento térmico, de hasta 350 KWh/m^3 , dependiendo de la reacción. No obstante, al necesitar para ello alcanzar temperaturas cercanas a 130°C , no se aplican como estrategias de acondicionamiento pasivo [13] y no se consideran en este trabajo.

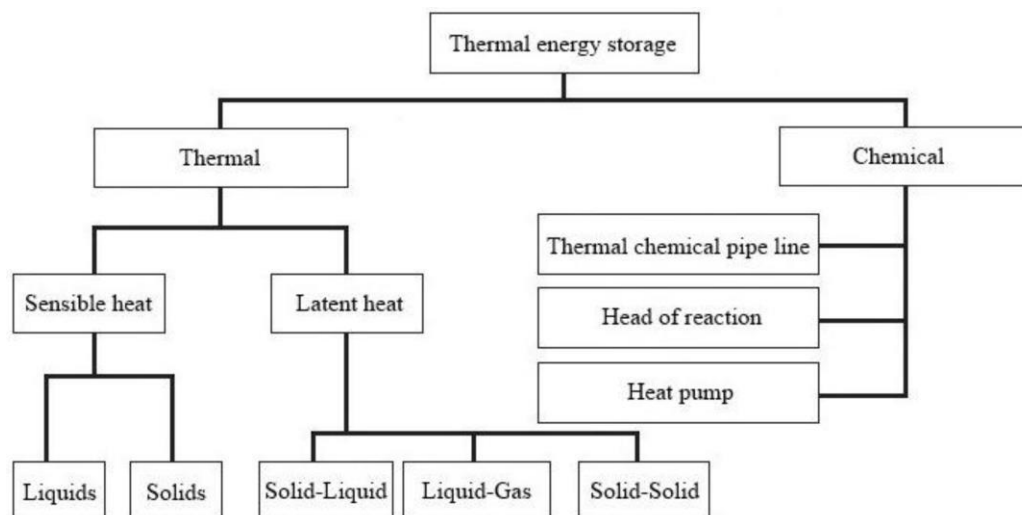


Figura 2-1 Formas de almacenamiento de energía térmica [14]

2.1.2 Energía de calor sensible

El almacenamiento de energía por calor sensible utiliza materiales que no cambian de fase en el rango de temperaturas en que opera el sistema. Es decir, la sustancia empleada absorbe o libera energía a medida que aumenta o disminuye su temperatura, sin llegar a cambiar de fase. A su vez, estos materiales deben ser baratos y tener una buena conductividad térmica que ofrezca a dichos SAE una mayor competitividad. Los principales tipos de almacenamiento de calor sensible se realizan mediante cavidades subterráneas como acuíferos, tanques de agua o lechos de grava. En el almacenamiento por calor sensible, la energía almacenada por unidad de masa depende del calor específico del material (C_p), del diferencial de la temperatura (dT) y de la masa (m) como muestra la siguiente ecuación [15].

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} m \cdot C_p(T) \cdot dT$$

El almacenamiento por calor sensible es el método de almacenamiento de energía térmica más utilizado. El almacenamiento de ACS en todas las casas se realiza de esta manera. Otras aplicaciones para esta tecnología van desde el almacenamiento de frío hasta plantas de energía solar. El gran inconveniente es su poca capacidad de almacenamiento comparado con el de calor latente o el termoquímico [16].

2.1.3 Energía de calor latente

El calor latente se refiere a la cantidad de calor que necesita una sustancia para pasar de sólido a líquido y de líquido a gaseoso, cambiando su estructura molecular. Ésta es la razón por la que la cantidad de calor necesaria viene dada por una temperatura distinta para cada material. Por lo tanto, la energía por calor latente es aquella relativa al cambio de fase de un material, con una densidad de almacenamiento muy superior a la que corresponde al calor sensible. Como se puede observar en la Figura 2-2, durante el cambio de fase la temperatura permanece constante, mientras la cantidad de energía almacenada aumenta notablemente. Los materiales usados en este tipo de almacenamiento energético son los ya mencionados materiales de cambio de fase (PCM).

La ecuación por la que se rige el almacenamiento o liberación de energía es la siguiente:

$$Q = m \cdot \Delta h_f$$

Donde:

- Q es el calor liberado o almacenado.
- m es la masa.

- Δh_f es la entalpía o calor latente del cambio de fase en cuestión.

Cabe destacar que estas entalpías y la temperatura a la que se produce el cambio de fase son funciones de la presión.

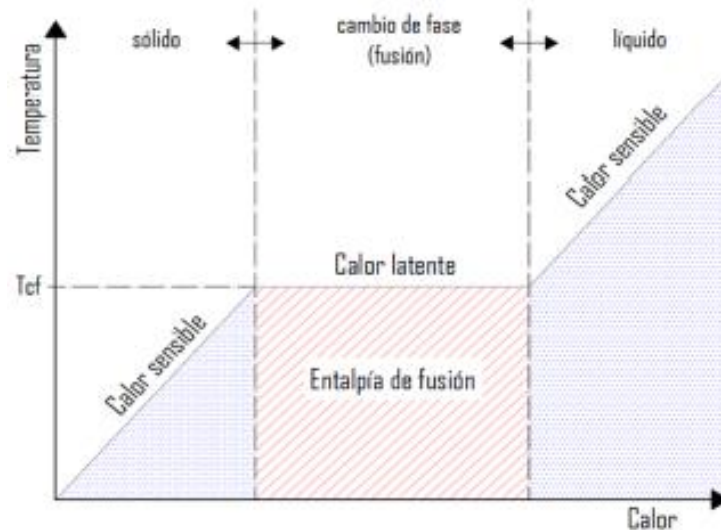


Figura 2-2 Gráfica calor sensible y calor latente [17]

Esta forma de almacenamiento posee grandes ventajas frente a las mencionadas anteriormente [18]:

- Gran densidad de almacenamiento, muy superior a la de calor sensible y cercana al nivel de las reacciones termoquímicas.
- Se reducen las pérdidas energéticas derivadas de la variación de temperatura necesaria en el almacenamiento por calor sensible.
- Posibilidad de selección de la temperatura de trabajo.
- Cambio de fase a temperatura constante.

Existen 3 posibles cambios de fase sólido-sólido (cambio de estructura cristalina a amorfa), sólido-líquido y líquido-gas. El cambio de fase de líquido a gaseoso, a pesar de ser el proceso con mayor densidad de energía de los tres posibles cambios de fase, acarrea un cambio en volumen del material que hace que no sea útil para el almacenamiento térmico latente en edificación. El cambio de sólido a líquido, aunque en menor medida, presenta un alto calor latente y además no supone problemas de control de presión por aumento de volumen, convirtiéndolo en la opción de almacenamiento de energía por calor latente más usada [16].

Es bien sabido que los átomos en la fase líquida son más enérgicos que en la fase sólida [18]. Por ello, para que un sólido pase a líquido, deberá adquirir cierta energía para superar las fuerzas de cohesión que mantienen su estructura de sólido. Esta energía se denomina calor latente de fusión y representa la entalpía o diferencia de energía térmica entre las fases [18]. Por contrapartida y cómo se puede observar en la Figura 2-3, se puede deducir entonces que para la solidificación de un líquido se requerirá la cesión de este calor latente, que devuelva a los átomos a su posición de estabilidad [19].

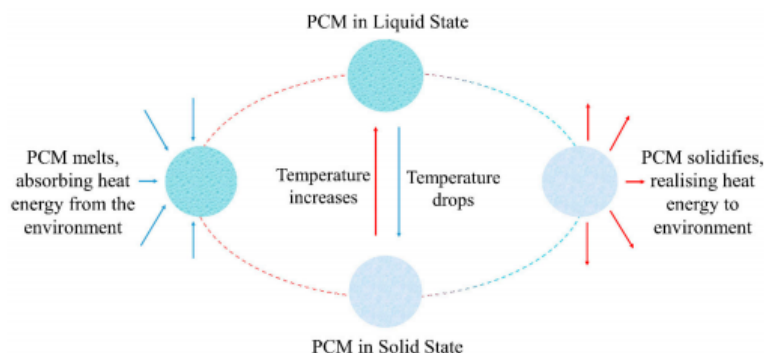


Figura 2-3 Absorción y cesión de energía en el cambio de fase [16]

Debido a su desarrollo más reciente, el uso de los sistemas TES (Thermal Energy Storage) por calor latente tiene menor aplicación que aquellos mediante calor sensible. No obstante, en los últimos años hemos sido testigos de una mayor investigación de los sistemas por calor latente, que ha obtenido resultados prometedores en aplicaciones reales como las instalaciones de energía solar, que utilizan sales derretidas como medio de almacenamiento. También se está produciendo un importante desarrollo en su utilización para proporcionar confort en las viviendas y el almacenamiento de ACS. Además, la Agencia Internacional de la Energía (IEA) tiene a un grupo de expertos que conforman el IEA Task 42, que investigan sistemas TES más eficientes y la mejora de los ya existentes [15].

2.2 Materiales de cambio de fase (PCM)

2.2.1 Generalidades

Los materiales de cambio de fase constituyen uno de los métodos más eficientes de almacenamiento térmico. Se conocen internacionalmente por sus siglas en inglés PCM (Phase Change Materials) y así se denominarán en el presente trabajo. Como consecuencia de la aplicación de energía térmica sobre ellos, estos materiales cambian de estado a una determinada temperatura en función de la sustancia en cuestión y su calor latente. Una vez alcanzada esta temperatura, se mantiene constante durante la absorción de energía, la cual es liberada cuando sea requerido [20].

El diseño y fabricación de materiales de cambio de fase con diferentes propiedades físicas, cinéticas, químicas y térmicas se remonta al primer tercio del siglo pasado, como respuesta a las distintas necesidades y aplicaciones que se les requerían. En la Figura 2-4, se detallan algunos de los primeros hitos de dicho periodo:

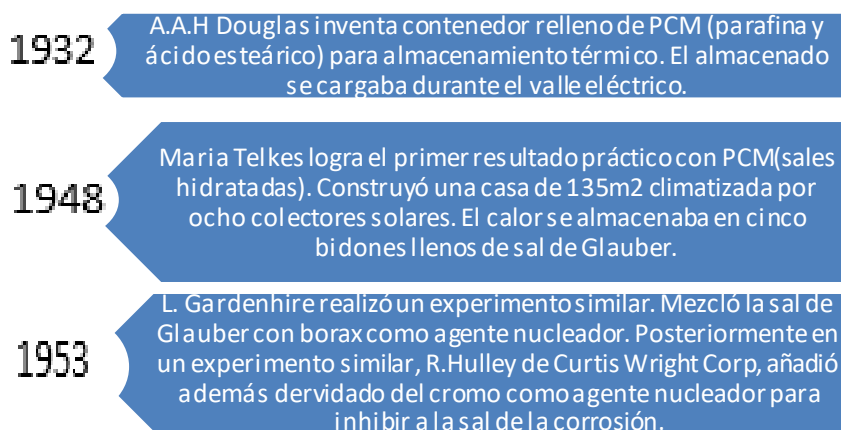


Figura 2-4 Reseña histórica de los primeros hitos (elaboración propia basada en [18])

A pesar de todos los avances que derivaron de estos experimentos, no se obtuvieron los resultados esperados. No obstante, los PCM se siguieron estudiando exhaustivamente y se fueron desarrollando nuevas aplicaciones [21]. Posteriormente, el vehículo lunar Rover del Apollo 15 utilizó parafina como método de almacenamiento térmico, la cual ofreció resultados provechosos en tres sistemas de la misión espacial en el año 1960 [22]. Sería a finales del siglo XX cuando se produce un notable salto en el desarrollo de los PCM y se descubren nuevas aplicaciones.

En el ámbito de la edificación, las primeras publicaciones sobre la utilización de PCM vinieron de la mano de Telkes en 1975 [23] y Lane en 1986 [24]. A su vez, Barkmann y Wessling [25] publicaron en 1975 sus investigaciones sobre el uso de componentes estructurales para el almacenamiento térmico.

2.2.2 Principales características

Como se ha mencionado en párrafos anteriores, estos materiales son capaces de mantener constante la temperatura durante el cambio de fase, mientras que almacenan o ceden energía. Este sistema de almacenamiento ofrece ciertas ventajas con respecto a los otros sistemas en el sector de la edificación, como se enumeraba en el punto 2.1.3.

Las características que se requieren para la utilización de los materiales de cambio de fase en la edificación son los siguientes [26]:

- Temperatura de cambio de fase entre 5°C y 35°C.
- Alta estabilidad a los ciclos de cambio de fase, debido a la larga vida útil de los edificios.
- Los PCM deben ser no corrosivos para evitar daños estructurales.

Por lo tanto, los principales requisitos desde el punto de vista material son alta entalpía de cambio de fase y una temperatura de cambio de fase adecuada, dependiendo de la aplicación para la que se vaya a emplear el PCM. Un material sólo es apto para su aplicación en la edificación si tiene una estabilidad a los ciclos significativa, es decir, que conserva sus propiedades tras pasar por un alto número de cambios de fase. Esta estabilidad engloba las propiedades térmicas, químicas y físicas del material [27]:

Según la información recopilada de diferentes autores [28, 29] las propiedades más importantes que definen un PCM son:

- Propiedades termofísicas:
 - Temperatura de fusión en el rango de funcionamiento según la aplicación.
 - Alto calor latente de fusión.
 - Alto calor específico para proporcionar adicionalmente un notable calor sensible.
 - Conductividad térmica en fase sólida y líquida, es decir, buena transferencia de calor.
 - Poca variación en volumen en cambio de fase.
 - Puntos de fusión/solidificación congruentes en cada ciclo, con el mínimo subenfriamiento.
 - Cambio de fase reproducible (largo plazo).
- Nucleación y crecimiento de cristales:
 - Alta tasa de nucleación para evitar subenfriamiento de la fase líquida en la solidificación.
 - Tasa de crecimiento de los cristales alta, para así poder satisfacer la demanda de recuperación de calor de sistema de almacenamiento.

- Propiedades químicas:
 - No inflamable.
 - No tóxico.
 - No corrosivos (para encapsulados).
 - Ciclo fusión/salificación reversible.
 - Baja degradación del material tras un elevado número de ciclos.
- Económicas:
 - Rentable
 - Abundante y disponible.
 - Fácil reciclaje y tratamiento.
 - Buen comportamiento ambiental, basado en ACV.

La estabilidad química se suele estudiar con la ayuda de la espectroscopia de infrarrojos [30]. A su vez, una prueba de estabilidad térmica asegura que el PCM es estable a una temperatura de trabajo constante. La máxima temperatura que puede aguantar un PCM se denomina temperatura de degradación. La estabilidad térmica se puede estudiar en un horno o con TGA (análisis termogravimétrico) [27], como se hará en el presente trabajo y veremos más adelante.

2.2.3 Clasificación de los PCM

Durante las últimas décadas, se han desarrollado y estudiado en profundidad numerosos PCM con un gran rango de puntos de fusión/solidificación que varían entre los 20°C y 80°C. Estos materiales se pueden agrupar, según su estructura química, en orgánicos (como parafinas y ácidos grasos), inorgánicos (como metales e hidratos de sales) y eutécticos (mezcla de orgánicos y/o inorgánicos). Una posible clasificación de las sustancias empleadas para el almacenamiento térmico, centrada en el cambio de fase sólido-líquido por ser el más viable, fue realizada por Abhat en 1983 [31] como se puede observar en el siguiente esquema (Figura 2-5):



Figura 2-5 Clasificación según Abhat [31]

Con el comienzo del siglo XXI, Sharma y Sagara [32] presentaron en 2005 otra clasificación más detallada y simplificada de los materiales de cambio de fase (Véase Figura 2-6).



Figura 2-6 Clasificación de los materiales de cambio de fase [26]

Los materiales orgánicos se dividen a su vez en parafínicos y no parafínicos. Sus principales características son fusión/solidificación congruente (un sólido se funde y da lugar a un líquido con la misma composición y viceversa) y autonucleación. En la inmensa mayoría de los casos no son corrosivos para el material que los contiene. Entre ellos, la cera de parafina es muy estable a ciclos de congelación y fusión, no es tóxica y tiene baja reactividad. Otro aspecto positivo es que tiene la capacidad de ajustarse a un amplio rango de temperaturas de cambio de fase. Su aspecto desfavorable más significativo es su inflamabilidad.

Los materiales inorgánicos también se subdividen en sales hidratadas y metales. Sus principales características son: un elevado calor latente por unidad de masa, más barato que los orgánicos y al contrario que éstos no son inflamables. Además, mantienen una temperatura estable durante el cambio de fase. No obstante, tienen importantes desventajas como son el subenfriamiento y la segregación de fases, que pueden hacer variar sus propiedades [33].

Por hacer una pequeña comparación, las ceras de parafina a pesar de estar disponibles en el mercado, su calor latente es sólo la mitad del que poseen las sales hidratadas. Por este motivo, varios estudios en los últimos años se han centrado en las sales hidratadas por su bajo precio y alta disponibilidad. No obstante, éstas presentan importantes inconvenientes como la segregación y subenfriamiento, que alteran sus propiedades térmicas. Esto ha ocasionado un creciente interés en nuevos materiales como las parafinas, las sustancias orgánicas anhidras y los ácidos grasos. Estos materiales, a pesar de ser más caros, solventan los problemas de comportamiento térmico de los hidratos de sales y a su vez presentan ventajas como la estabilidad física y química. A continuación, se puede observar a modo de resumen en la Tabla 2-1 y Tabla 2-2 las ventajas y desventajas de los materiales orgánicos e inorgánicos.

VENTAJAS

Orgánicos	Inorgánicos
Fáciles de usar	Mayor entalpía de cambio de fase
No corrosivo	Mayor conductividad térmica
Subenfriamiento bajo o nulo	No inflamables
Estabilidad térmica y química	Menor variación de volumen en cambio de fase
Más fáciles de encapsular	Biodegradables

Tabla 2-1 Ventajas materiales orgánicos e inorgánicos (elaboración propia basada en [33])

DESVENTAJAS

Orgánicos	Inorgánicos
Menor entalpía de cambio de fase	Corrosivo con metales
Menor conductividad térmica	Subenfriamiento
Inflamables	Segregación de fases (poca estabilidad térmica sin aditivos)
Mayor coste	Bajas temperaturas de fusión
Mayor variación de volumen en cambio de fase	Encapsulamiento más difícil

Tabla 2-2 Desventajas materiales orgánicos e inorgánicos (elaboración propia basada en [33])

Las mezclas eutécticas se están formadas por dos o más componentes y tienen un punto de fusión y solidificación más bajo que el que posee cada uno de los componentes por separado, creándose una mezcla de los cristales durante la cristalización. Esto provoca que la mezcla alcance un punto de congelación lo más bajo posible y que ambos se solidifiquen a esa temperatura eutéctica [18]. Las mezclas eutécticas se dividen en tres tipos atendiendo al siguiente criterio: si se mezcla una sustancia orgánica con otra orgánica, una sustancia inorgánica con otra inorgánica o bien se mezclan una sustancia orgánica con una inorgánica.

A modo ilustrativo, se pueden observar en la Figura 2-7 los datos térmicos más representativos de las familias de materiales de cambio de fase según su estructura química, en función de su temperatura y entalpía de fusión.

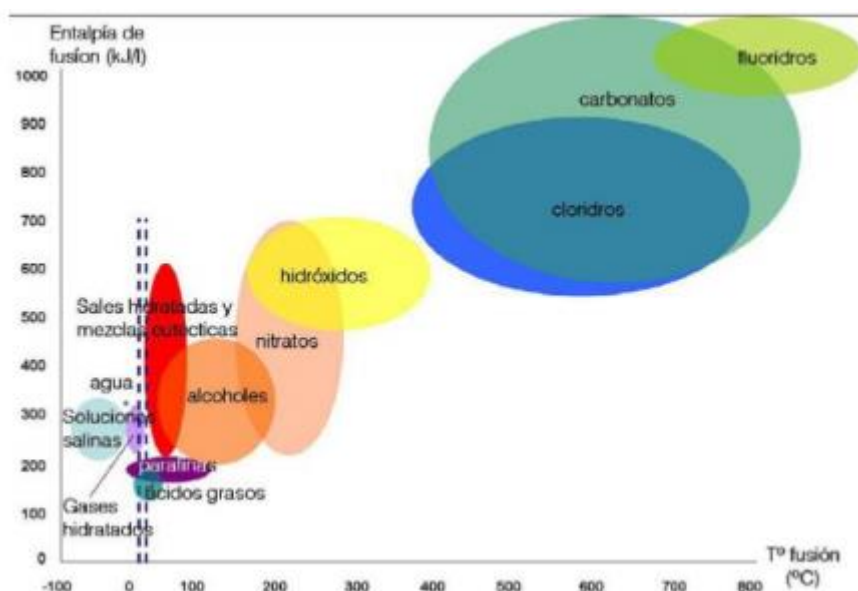


Figura 2-7 Relación entre temperatura y entalpía de fusión [21]

2.2.4 Los PCM en la edificación

Muchos factores son los que influyen en la temperatura del aire en el interior de un edificio. Estos incluyen tanto factores climáticos (como la temperatura exterior, el viento y la radiación solar) como la estructura del edificio y las características termofísicas de los materiales que lo componen [34]. Respecto a los factores climatológicos, es importante diferenciar las características de la ubicación para la elección del material de cambio de fase idóneo.

El uso de almacenamiento por calor latente en sistemas de acondicionamiento pasivo en los edificios puede contribuir a reducir el consumo energético de los sistemas HVAC (heating, ventilation and air conditioning). A continuación, se describe brevemente su modo de contribuir al confort térmico en el interior de los edificios a la par que contribuye en la reducción de consumo energético.

Durante el día, la radiación solar y unas mayores temperaturas resultan en un flujo de calor que penetra las paredes del edificio. El PCM absorbe el calor mediante su proceso de fusión, retrasando la penetración del calor hacia la superficie interior de la pared, reduciendo su pico máximo a su vez. Durante la mayoría del día, la temperatura permanece dentro del margen de confort y los sistemas de aire acondicionado consumen menos energía. Por la noche, cuando la temperatura exterior disminuye, el PCM libera el calor almacenado a través su proceso de solidificación tanto al exterior como al interior, manteniendo así la temperatura de confort en el edificio y cerrando el ciclo diario. A continuación, en la Figura 2-8 se puede observar un ejemplo de dicho ciclo de funcionamiento y en la Figura 2-9 las acciones de los PCM frente a las variaciones de temperatura.

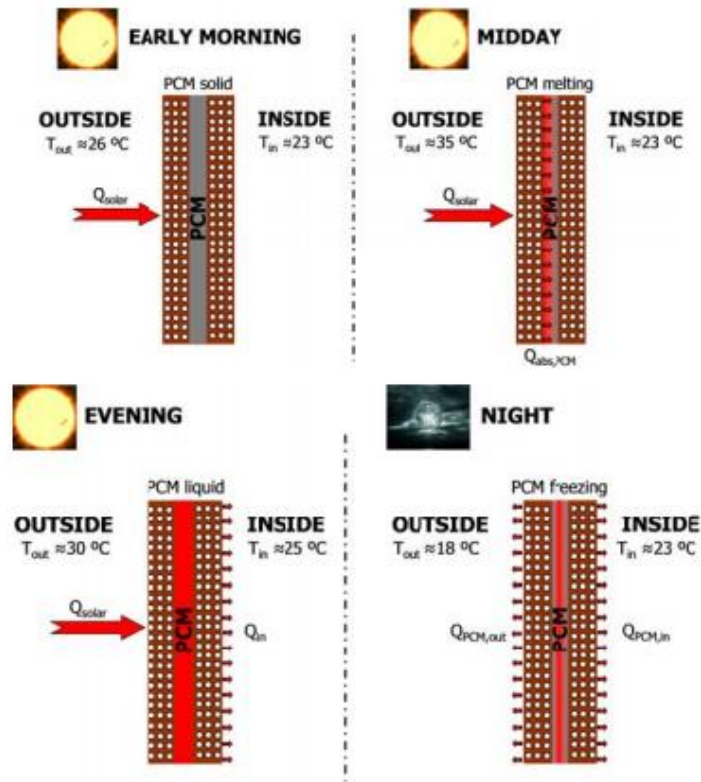


Figura 2-8 Principio de funcionamiento de los PCM en edificación [28]

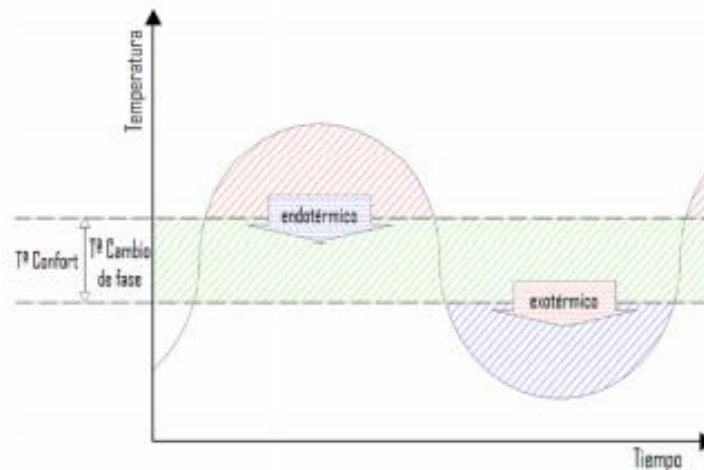


Figura 2-9 Funcionamiento del PCM frente a variación de temperatura [17]

El desplazamiento de consumo de energía eléctrica entre los periodos de máxima demanda a los de menor conlleva un beneficio económico significativo para las empresas que lo suministran, así como una notable reducción de emisiones de gases de efecto invernadero fruto del consumo de combustibles fósiles empleados en acondicionamiento activo. En la Figura 2-10 se puede observar la diferencia de flujo térmico en el interior de las paredes entre las de hormigón y las que están aditivadas con PCM, así como el aplanamiento que los últimos provocan en la curva de demanda de energía eléctrica a lo largo del día.

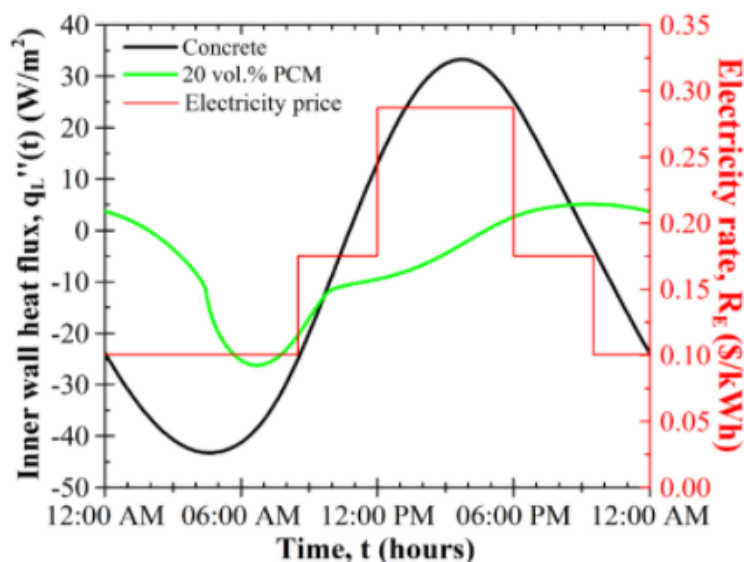


Figura 2-10 Flujo de calor y consumo eléctrico (hormigón frente a recubrimiento con PCM) [35]

La aplicación de materiales de cambio de fase a elementos constructivos ha sido objeto de un creciente número de investigaciones. No obstante, sigue siendo una tecnología incipiente con mucho margen de desarrollo. Estas investigaciones han obtenido resultados muy positivos en los siguientes ámbitos:

- PCM en suelo radiante [36].
- PCM en panel de yeso para muros [37].
- PCM en cubiertas inclinadas con placas fotovoltaicas [38].

2.2.4.1 Requisitos

El aumento de la eficiencia energética en los edificios produce un aumento de la estanqueidad en ellos. Al aumentar el aislamiento en la envolvente térmica disminuye el aire que penetra a través de ella. Todo lo anterior puede ocasionar un aumento en la concentración de CO_2 , de la humedad relativa, humedades de condensación y en general un ambiente insalubre, si no se siguen determinadas pautas.

El Código Técnico de la Edificación (CTE) recopila una serie de requisitos básicos que han de cumplir los edificios y por ende los productos y materiales que los componen (por ejemplo respecto a la inflamabilidad o la salubridad). Estas exigencias variarán según se dispongan los materiales en el edificio. Si los PCM, al estar confinados, no entran en contacto con el medio la salubridad del edificio puede estar garantizada sin necesidad de comprobar la influencia de estos.

En cualquier otro caso, los PCM deben atender entre otros al Reglamento del Consejo Europeo N°1907/2006 relativo a la evaluación, autorización y restricción de las sustancias y preparados químicos (REACH).

En general, los productos de construcción deben seguir el Reglamento (UE) N°305/2011 del Parlamento Europeo, por el que se establecen condiciones normalizadas para la comercialización de elementos constructivos. Este reglamento establece una serie de requisitos básicos de las obras de edificación, entre los cuales se encuentran los relativos a la higiene, salubridad, medio ambiente (emisiones nocivas, gases de efecto invernadero, compuestos volátiles) y la utilización sostenible de los recursos naturales [33].

2.3 Morteros de cal

Antes de discutir la composición y propiedades de los morteros de cal, así como la adición de materiales de cambio de fase a los mismos para el acondicionamiento pasivo en la edificación, es conveniente hacer una breve reseña histórica de este material para conocer su evolución.

La utilización de la cal como conglomerante se remonta a la más remota antigüedad, siendo durante siglos el material más usado como tal por el hombre. El empleo de la cal como aglomerante para revestimientos exteriores e interiores ha sido continuado a lo largo de la historia de las civilizaciones que rodean el Mediterráneo. La gran calidad de estos morteros queda demostrada a lo largo de la historia. Basta con observar las bóvedas de las catedrales, cuyos sillares unidos por mortero de cal llevan siglos suspendidos a considerables alturas, impidiendo que penetre el agua. En numerosas ocasiones las capas de pintura de las iglesias quedaron cubiertas bajo los revestimientos de cal que se aplicaban durante plagas y epidemias por su capacidad de mantener una atmósfera salubre.

Pese a tener una larga tradición en el sector de la construcción, avalada por su versatilidad y buenas prestaciones, el empleo de la cal fue relegada a un segundo plano con la proliferación del cemento y el cambio de las tipologías estructurales (metálicas y de hormigón armado). Ahora que la bioconstrucción es una necesidad, los morteros de cal vuelven a estar en auge y su empleo está cada vez más extendido. En un principio se empleaba mayoritariamente en la restauración del patrimonio histórico, por ser menos agresivo con los materiales ya presentes. Hoy en día se utiliza la cal en diversos ámbitos de la construcción.

2.3.1 Generalidades

Las cales para construcción están divididas en diferentes tipos según su composición química, atendiendo a la Norma Europea UNE_EN 459-1. Como se puede observar en la Figura 2-11, además de las distintas aplicaciones de la cal, hay una división pormenorizada de los tipos empleados en construcción. Se dividen principalmente cal aérea y cal hidráulica. No obstante, el presente trabajo se centrará únicamente en la descripción detallada del tipo que se empleará en los ensayos que se estudian en el mismo, la cal hidratada.

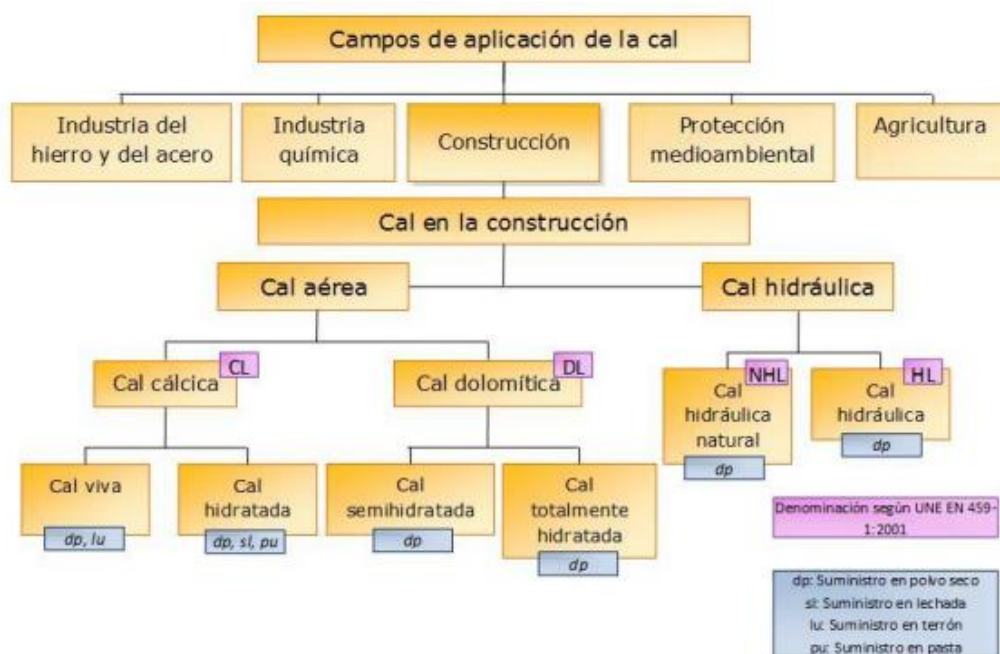


Figura 2-11 Ámbitos de aplicación de la cal y tipos usados en construcción [39]

De acuerdo con el esquema anterior y siguiendo el camino que lleva a la cal en cuestión (cal hidratada), se deduce que se integra en las siguientes categorías:

- Cales aéreas: Producto de la calcinación de calizas, conformadas por óxido/hidróxido de calcio y/o magnesio. No poseen propiedades hidráulicas al no fraguar y endurecer al mezclar con agua.
 - Cales cálcicas: Calcinación de rocas calizas. Son puras y su riqueza en calcio es superior al 95% (componente fundamental CaO y Magnesio $<5\%$).

Tras esta clasificación quedaría la cal viva y la cal hidratada y su diferencia es que la segunda se obtiene del apagado de la primera. El proceso de fabricación es común hasta cierto punto, como se puede observar a continuación:

1. Se parte con la calcinación a 900°C de piedra caliza (CaCO_3) lo más pura posible. En este proceso se desprende CO_2 y aparece óxido cálcico (CaO).
2. El CaO o cal viva es un producto cáustico que reacciona con el agua generando calor e hidróxido cálcico $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Este proceso se denomina “apagado de la cal” y se puede realizar por aspersión o inmersión.
3. Por último, esta cal se mezcla con áridos finos o gruesos y agua, obteniendo así los morteros de cal. Estos a su vez reaccionan con el CO_2 presente en el aire, dando lugar de nuevo al carbonato cálcico (CaCO_3).

En la Figura 2-12 se puede observar un gráfico que ilustra el ciclo de la elaboración de los morteros de cal que se acaba de describir.

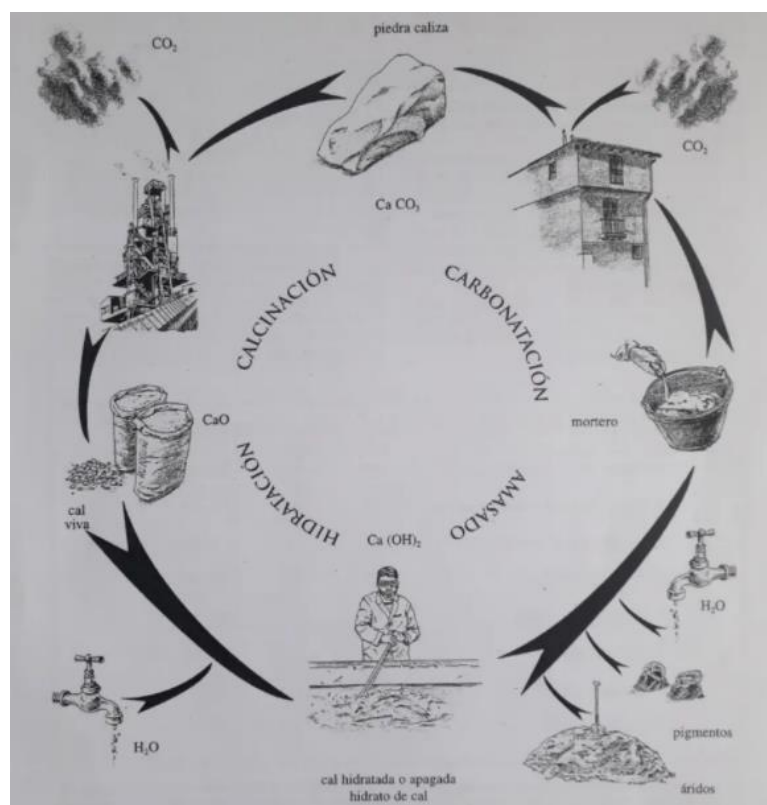


Figura 2-12 Ciclo de elaboración de los morteros de cal [40]

Las cales aéreas cálcicas hidratadas son las más utilizadas en la fabricación de los morteros. Se debe siempre utilizar la cal hidratada completamente apagada para evitar fisuras y desperfectos superficiales por el aumento de volumen resultado de la hidratación posterior a la aplicación del mortero. Debe cumplir con la norma UNE-EN 459-2 relativa a la estabilidad de volumen.

2.3.2 Tipos de mortero de cal

Se puede establecer una clasificación entre morteros de cal de acuerdo con el conglomerante que se añade a ellos. Los morteros pueden denominarse según su composición y la proporción de sus componentes o bien según la norma UNE EN 998-2, que define su resistencia a compresión a 28 días (Véase Tabla 2-3).

Conglomerante	Composición (ejemplos)	Resistencia
Mortero de cal hidráulica	cal:arena (1:3)	Por ejemplo: - M-5 (5N/mm ²) a 28 días - M-20 (20N/mm ²) a 28 días.
Mortero de cal aérea	cal:arena (1:3)	
Mortero mixto (cemento y cal hidráulica)	cemento:cal:arena (1:1:3)	
Mortero mixto (cemento y cal aérea)	cemento:cal:arena (1:1:3)	

Tabla 2-3 Clasificación de morteros de cal (elaboración propia basada en [39])

Cabe destacar la importancia de especificar si las proporciones son en peso o en volumen, así como detallar la cantidad de agua empleada en el amasado de la mezcla.

2.3.3 Ventajas de los morteros de cal

La cantidad de ventajas y propiedades beneficiosas que aporta la cal a los morteros es más que significativa. Ejemplos de ellas son la mejora de la plasticidad y trabajabilidad, obtención de morteros más flexibles y con mayor adherencia, facilitación del reamasado, incremento de la retención de agua y curado autógeno con menor retracción y fisuración. Posee una gran versatilidad, a diferencia del cemento no produce sales nocivas, su elasticidad evita las retracciones y sólo se emplean los áridos necesarios para proporcionarle su textura final. Además, aunque su uso haya estado más extendido, los morteros de cemento tienen una menor durabilidad que los de cal.

En cuanto a sostenibilidad, se puede decir que la cal apagada tras carbonatarse completamente retorna a su estado original, que es el de roca caliza. En la Tabla 2-4 se expone un resumen de las características favorables de los morteros de cal.

VENTAJAS DE LOS MORTEROS DE CAL	
Buena plasticidad y trabajabilidad	Buen aislamiento térmico y acústico
Ausencia de retracción	No provoca eflorescencias (no hay sales solubles)
Gran elasticidad (favorece deformaciones sin agrietamientos)	Buena resistencia a la penetración de agua
Volumen constante bajo condiciones variables de humedad	Desinfectante y fungicida natural
Permeabilidad al vapor de agua (evita condensaciones)	Ignífugo y no emite gases tóxicos

Tabla 2-4 Resumen de ventajas de los morteros de cal

2.3.4 Morteros de cal y PCM

Los morteros aditivados con PCM para la aplicación de revestimientos interiores pueden presentar una de las claves para minimizar el masivo consumo energético relacionado con los edificios. Como se comentaba en el apartado 2.2.1, estos materiales tienen la capacidad de reducir las fluctuaciones de temperatura gracias a su habilidad para alterar su propio estado en función de la temperatura ambiente, absorbiendo y cediendo energía. Por ende, la adición de PCM a los morteros trae beneficios sociales, económicos y medioambientales, contribuyendo a una construcción sostenible. Los beneficios sociales están relacionados directamente con la mejora del confort térmico. En el aspecto medioambiental, se reduce el consumo de combustibles fósiles como resultado de un menor uso de equipos de aire acondicionado. Los beneficios económicos son los referidos a la reducción de consumo energético y su retraso, que beneficia a las horas de menor demanda [41].

La incorporación de PCM en morteros ha sido objeto de estudio e interés por parte de la comunidad científica desde hace varios años. No obstante, la caracterización y comparación del rendimiento térmico entre morteros con distintos aglomerantes sigue siendo uno de los vacíos de este campo. A pesar de que la investigación con cemento y hormigón ha sido la más prolífica hasta ahora, se está produciendo un creciente interés en explorar la mezcla de PCM con aglomerantes alternativos. Cabe destacar que los morteros de cal hidratada, que se estudiarán en el presente trabajo, pueden ofrecer resultados muy diferentes que los de cemento, tras la adición de cápsulas de PCM [42]. Este hecho está directamente relacionado con la porosidad interna de los morteros de cal, donde los PCM pueden encajar y rellenar la microestructura.

Los estudios parecen indicar que los PCM pueden llenar parcialmente los poros de los morteros de cal mucho mejor que en los de cemento, mitigando la pérdida de las propiedades mecánicas y en algunos casos hasta mejorándolas. Este efecto se aplica a su vez a morteros de cal que aparte de PCM añaden también otros aditivos. Es el caso de un reciente estudio donde se añaden microcápsulas de parafina y nanopartículas de dióxido de titanio al mortero de cal. Los resultados mostraron que la presencia de PCM mejoró las propiedades de los morteros [43]. Aparte de dicho estudio, encontramos en la literatura numerosos trabajos e investigaciones sobre la adición de materiales de cambio de fase a los morteros de cal ([44], [41], [45]).

2.3.5 Métodos de incorporación de PCM

Varios métodos de incorporación de PCM han sido investigados hasta la fecha. Hawes en 1993 realizó un estudio en el que consideraba los tres métodos más prometedores [46]: incorporación directa, inmersión y encapsulación. Además, los PCM pueden ser usados en forma de lámina combinada con otros elementos empleados en el revestimiento de edificios.

- **Incorporación directa:** Se trata de un método económico ya que no se requiere apenas se necesita material adicional. El PCM en estado líquido o en forma de polvo se añade con materiales de construcción como el cemento, yeso o cal en su proceso de producción. Un ejemplo de este método es que ya se ha producido, a escala de laboratorio, yeso con incorporación directa de un 21-22% de butil estearato de calidad comercial [47].
- **Inmersión:** En este método, los materiales de construcción (yeso, cemento, cal u hormigón) son sumergidos en el PCM derretido, el cual es absorbido por los poros por la acción capilar. Una vez enfriado el PCM se mantiene en los poros del material en cuestión. Hawes y Feldman [48] establecieron las constantes de absorción del PCM en hormigón. No obstante, como advierte Schossig [49], las fugas pueden ser un problema a largo plazo para este método.
- **Encapsulación:** Para evitar los efectos adversos de los PCM sobre los materiales de construcción, los PCM pueden encapsularse antes de ser incorporados. Hay dos maneras principales para encapsularlos: macro-encapsulación y micro-encapsulación. Para el primer método, los PCM se empaquetan en pequeñas bolsas, esferas, paneles o cualquier otro tipo

de recipiente antes de ser incorporados (Véase Figura 2-13). Como ejemplo, se desarrolló un muro que integraba parafina altamente cristalina como PCM, el cual demostró reducir el flujo de calor en hasta un 38% [50]. No obstante, la macro-encapsulación tiene la desventaja de necesitar estar muy protegido frente a rotura y requiere mucho trabajo integrarlo en materiales constructivos, resultando caro. Otro inconveniente es la disminución en la tasa de transferencia de calor durante el proceso de solidificación, teniendo el PCM pobres coeficientes de transferencia de calor en estado sólido.

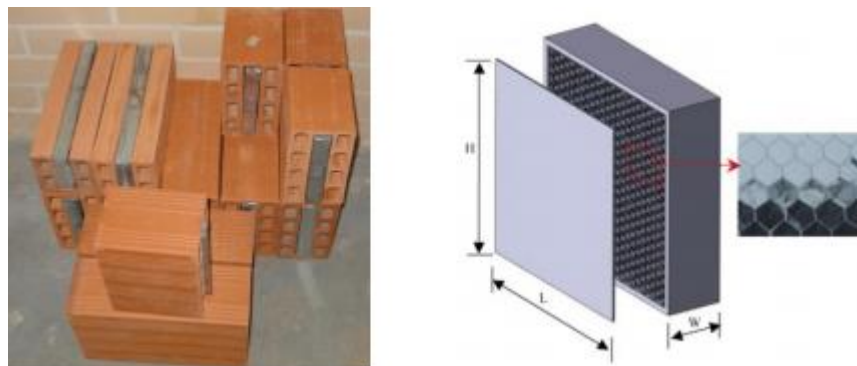


Figura 2-13 Ejemplo de ladrillos con PCM macro-encapsulado [51]

En micro-encapsulación se encierran pequeñas partículas de PCM en una fina película polimérica de gran peso molecular, la cual debe ser compatible tanto con el PCM como con los materiales de construcción. Tiene las ventajas de ser de aplicación fácil, buena tasa de transferencia de calor debido al aumento de superficie de contacto y no necesita especial protección frente a rotura. No obstante, puede que afecte a las propiedades mecánicas de la estructura. Hawlader investigó la influencia de diferentes parámetros en las características y rendimiento de un PCM micro-encapsulado, en los aspectos de eficiencia de encapsulación, almacenamiento energético y capacidad de liberación de calor [52]. Los resultados indicaban que la cera de parafina micro-encapsulada es una técnica prometedora para el almacenamiento de la energía solar. En la Figura 2-14 y Figura 2-15 se puede observar tanto un esquema del funcionamiento de los PCM micro-encapsulados como una imagen SEM de PCM micro-encapsulado en mortero de yeso.

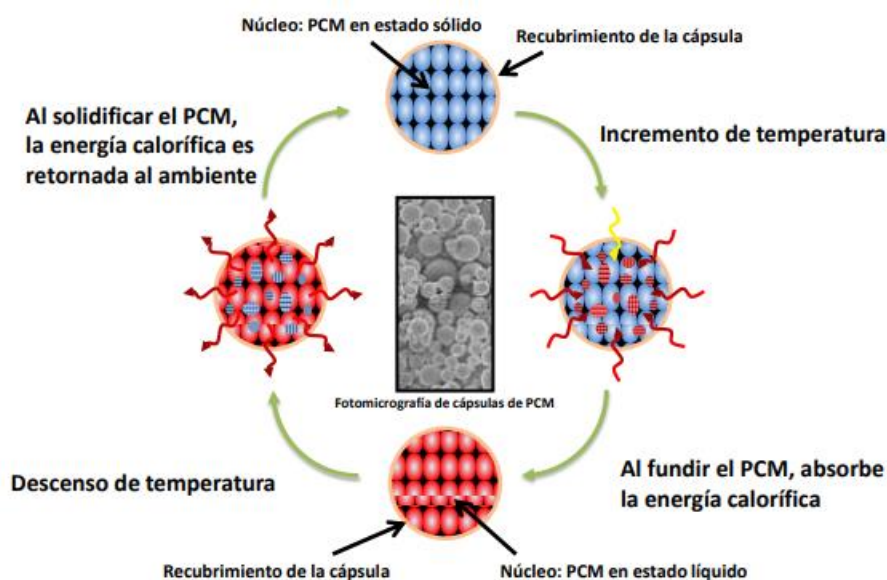


Figura 2-14 Esquema de funcionamiento de PCM micro-encapsulado [53]

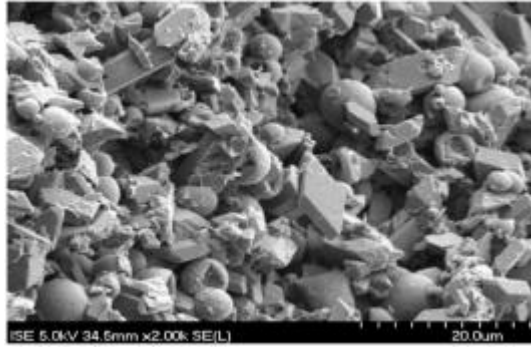


Figura 2-15 Imagen SEM de PCM micro-encapsulado en mortero de yeso [30]

En la última década, un nuevo tipo de compuesto con PCM denominado PCM estabilizado en forma (SSPCM o shape-stabilized PCM) ha sido objeto de interés para los investigadores. Consiste en parafina con polietileno de alta densidad u otro compuesto que actúe de soporte. Es más económico que los métodos anteriormente citados y la energía que puede almacenar es compatible a los sistemas tradicionales, ya que el porcentaje de parafina puede ser de hasta el 80%. Los resultados obtenidos hasta ahora indican que la aplicación de SSPCM en edificación es prometedora y debería seguir estudiándose [34].

3 DESARROLLO DEL TRABAJO

3.1 Materiales

En este apartado del trabajo se explican los procedimientos seguidos para la elaboración de muestras, los materiales elegidos para ellas y los instrumentos que han permitido llevar a cabo las distintas pruebas y mediciones. Además, se expone la elección de aglomerante y del PCM para el presente trabajo, así como su justificación.

3.1.1 Mortero de cal

En el presente trabajo se optó por utilizar la cal hidratada como aglomerante para realizar morteros aditivados con PCM. La razón por la que se escoge la cal, tal y como se comenta en el apartado 2.3.4es porque ya existen numerosos estudios sobre la adición de PCM a morteros de cemento o yeso y no se conoce a fondo el rendimiento que puede tener el PCM en este tipo de morteros. Las propiedades y primeros estudios sobre morteros de esta naturaleza presentan resultados prometedores [44].

El aglomerante escogido ha sido el hidróxido de calcio CL-90-S (90% de $\text{CaO}+\text{MgO}$) en polvo, uno de los más extendidos en el ámbito de la construcción. En el Anexo I: Cal Hidratada CL-90-S se puede encontrar su ficha técnica con los datos de identificación y aplicación del producto. A los morteros se les añadió también arena de sílice como árido fino. Estos áridos silíceos provienen de la descomposición del cuarzo y se consideran los mejores por su dureza y estabilidad química, además de ser un buen aislante térmico. En la Figura 3-1 podemos observar la utilizada en el presente trabajo.



Figura 3-1 Arena de sílice utilizada

Se realizaron tres tipos de morteros de cal, arena y agua, siguiendo la proporción 1:3 (ligante:arena) recomendada para la construcción. El primero de ellos se elaboró sin adición de PCM, a modo de referencia. El segundo con un 5% de PCM y el tercero con un 10%. Dichos porcentajes son en peso y están referidos al peso del ligante (cal con un contenido de agua suficiente para tener una pasta. El método de incorporación del PCM fue directo, en forma de polvo tras ser pasado a través de un tamiz. Una vez añadida la proporción de arena adecuada, se procedió a añadir agua hasta alcanzar una trabajabilidad adecuada de la mezcla. A modo de resumen se indican en la Tabla 3-1 los pesos de los componentes que constituyen cada mortero. El contenido de agua final que se añadió a cada una de las mezclas se determinó mediante el método gravimétrico, para lo cual se cogieron dos muestras de cada mortero húmedo y se metieron en una estufa ventilada a 70°C durante 72 horas (hasta alcanzar peso constante) y así poder ver claramente el porcentaje en agua de cada muestra a partir del peso inicial (con agua) y del peso seco. Los resultados quedan reflejados en la Tabla 3-2.

Mortero	PESO EN KG					PORCENTAJES		
	CAL	LIGANTE	ARENA	PCM	TOTAL	%LIGANTE	%ARENA	%PCM
PCM0	1,84	4,26	12,79	0,00	17,05	25,00	75,00	0,00
PCM5	2,95	5,66	16,00	0,28	21,94	25,80	72,91	1,29
PCM10	1,56	2,40	12,01	0,24	14,64	16,37	81,99	1,64

Tabla 3-1 Proporciones de los morteros

MUESTRA	PESO EN GRAMOS		%AGUA	
	PESO INICIAL	PESO SECO		
PCM0	37,15	31,43	18,20	17,74
	31,50	26,86	17,27	
PCM5	34,85	28,24	23,41	23,07
	44,96	36,63	22,74	
PCM10	40,62	34,28	18,49	18,60
	32,67	27,52	18,71	

Tabla 3-2 Porcentaje en agua de las muestras

Con los distintos morteros se elaboraron probetas con tres formas diferentes (cilíndricas, cúbicas y en forma de tronco de cono) para facilitar la realización de los experimentos a los que son sometidas en el presente trabajo. Las dimensiones de las probetas quedan reflejadas en el Anexo II: Dimensiones de las probetas. Debido a las irregularidades superficiales entre muestras del mismo tipo, todas las medidas son fruto de la media de tres medidas independientes para una misma dimensión, realizadas con pie de rey. A su vez, se realizó un registro fotográfico de las probetas con escala en centímetros para obtener una referencia más realista de las imágenes (Figura 3-2). Asimismo, se anexa a la memoria una tabla con las diferentes dimensiones de cada probeta (Anexo II: Dimensiones de las probetas).

La nomenclatura seguida para las probetas fue la siguiente: el primer dígito que acompaña a la letra es el porcentaje en peso de PCM aditivado y tras el mismo, tras el guion, se indica el número de muestra. Por ejemplo, PC10-2 equivale al mortero aditivado con un 10% de PCM, siendo la segunda muestra de las elaboradas con dicha composición.



Figura 3-2 Tipos de probetas empleadas

3.1.2 PCM

Debido a que el objetivo del presente trabajo es estudiar la durabilidad de los morteros aditivados con PCM, la investigación sobre el material a utilizar no se centró tanto en estudiar en profundidad cual sería el óptimo para aplicar en edificación, sino que se debió a cuestiones de precio y disponibilidad. Se realizó una comparación entre los PCM disponibles en el edificio de investigación del Centro Universitario de la Defensa y se eligió el material que mejores propiedades ofrece, realizando un balance entre propiedades termofísicas, mecánicas y químicas.

El material por el que se decidió optar en el presente trabajo es el *Rubitherm 35 HC* (RT35HC), donde el 35 simboliza la temperatura de cambio de fase de dicho material (Figura 3-3). Se trata de un material de cambio de fase orgánico y parafínico, una cera de parafina más concretamente. Las especificaciones del producto y sus propiedades detalladas se anexan en el Anexo IV: Ficha Técnica Rubitherm RT35HC. Esta decisión se basa en numerosos factores, atendiendo a la tabla comparativa realizada entre los candidatos disponibles (Tabla 3-3). En primer lugar, en cuanto a densidad se aprecia que los tres materiales tienen valores similares, por lo que la cantidad de material a utilizar será muy parecida y por ello no es un factor influyente. En cuanto a capacidad calorífica, aunque en la estearina sea superior, se decide usar el elegido ya que la temperatura de cambio de fase es notablemente más accesible y según el fabricante el almacenamiento/liberación de energía se produce a temperaturas constantes. Por estos motivos y por ser un material químicamente inerte, se opta por el Rubitherm.



Figura 3-3 Rubitherm RT35HC

MATERIAL	PUNTO DE FUSIÓN (GRADOS CELSIUS)	CAPACIDAD CALORÍFICA (KJ/Kg)	PRINCIPALES PROPIEDADES	DENSIDAD (Kg/L)	PRECIO (EUROS/Kg)
CERA DE SOJA -TIPO 1: Cera de soja CS-50 (bloque) -TIPO 2: Cera de soja C-3 (escamas)	47-54 (TIPO 1) 51-55 (TIPO 2)	-----	-Biodegradable -Renovable -No contaminante -No produce apenas hollín -Combustión más lenta que parafina.	0,90	TIPO 1: 3,6 TIPO 2: 4,2
STEARINA VEGETABLE	58-59	400	-Buena combustión -Alta pureza -Facilita solidificación -Colorea fácilmente -Producto derivado del aceite de palma	0,86	6,95
RUBITHERM RT35 HC	34-36	240	-Larga duración, con rendimiento estable a través de los ciclos de cambio de fase. -Almacenamiento y liberación de calor a temperaturas relativamente constantes.	Sólido 0,88 Líquido 0,77	NQR

Tabla 3-3 Tabla comparativa candidatos PCM

Este tipo de PCM ha dado buenos resultados y se presenta como uno de los mejores candidatos a la hora de incorporar materiales de cambio de fase a morteros de construcción [54]. En especial Rubitherm es una de las gamas más comercializadas en el sector de los PCM en edificación. Existen numerosos estudios sobre otros productos de la misma gama que el elegido, que operan en temperaturas de cambio de fase más bajas, como se puede observar en las referencias a estudios sobre cada material presente en la tabla del Anexo III: Lista de PCM's comerciales.

Por otro lado, como se destaca anteriormente, además de analizar los efectos de la adición de PCM a los morteros en cuanto a durabilidad, se estudiará el rendimiento del PCM elegido, para el que no se encuentran referencias de estudios anteriores y sin embargo es uno de los productos con mayor capacidad calorífica de la gama Rubitherm, con puntos de fusión que oscilan entre -9°C y 100°C y capacidades caloríficas en el rango de 120-260 (kJ/kg) [55].

3.2 Metodología

En este apartado se exponen los tres aspectos principales del presente trabajo:

- En primer lugar, se realiza la caracterización del mortero realizando diversas pruebas, con el objetivo de conocer a fondo las propiedades específicas del mortero que se ha elaborado y que servirán como punto de partida en el posterior análisis de los resultados.
- En segundo lugar, se enumeran y describen los ensayos de durabilidad a los que son sometidas las probetas, así como el material empleado para los mismos y los procedimientos seguidos para su desarrollo.
- Por último, se exponen los equipos y procedimientos empleados para obtener los datos específicos que se pretenden estudiar durante el transcurso cada uno de los ensayos.

3.2.1 Caracterización del mortero de cal

Antes de comenzar con los ensayos durabilidad que se pretenden analizar en el presente trabajo y tras dejar curar las muestras durante 28 días, se procedió a la caracterización de las principales propiedades de los morteros descritos anteriormente. Estas propiedades fueron:

- Porosidad accesible al agua, aplicando el ensayo recogido en la norma UNE-EN 83980 (2014). Este dato proporcionará información sobre el volumen de poros con tamaño superior a los $0,1\mu\text{m}$ que están conectados entre sí y con el exterior. Este parámetro es de suma relevancia ya que, a mayor porosidad accesible, mayor será la posibilidad de que agentes de alteración externos puedan penetrar en el interior del material.
- Porosidad accesible al mercurio y distribución porosimétrica. Ambos parámetros se determinaron mediante un porosímetro Auto Pore IV 9500 que permite mediante la inyección de mercurio a presión (en el rango de baja presión de 14 a 200 kPa y en alta presión de 0,2 a 225 MPa) determinar aquellos poros con tamaño de acceso entre $360\mu\text{m}$ y $3,8\text{nm}$. La forma y tamaño de los poros influye en la durabilidad de un material frente a las presiones internas que determinados agentes, como por ejemplo las sales solubles, pueden llegar a ejercer al cristalizar en su interior. Las presiones de cristalización serán más altas cuando estas se aplican en poros estrechos [56].
- Porosidad capilar, aplicando el ensayo recogido en la norma UNE-EN 15801 (2011) Este dato está relacionado con el volumen de poros que presenta un material en el rango entre $0,1\text{-}100\ (\mu\text{m})$ y es de suma importancia ya que la capilaridad es la principal vía de entrada del agua, junto con otros agentes, en materiales de construcción en servicio. Este parámetro influye en la altura de ascenso a la cual pueden llegar estos agentes de deterioro, de manera que a mayor volumen de poros dentro de ese rango ($0,1\text{-}100\ \mu\text{m}$) y dentro de este rango mayor volumen poroso en el intervalo más pequeño, mayor será la altura de ascenso [57].
- Dureza a compresión simple. Este parámetro se determinó de manera indirecta a través de mediciones realizadas con un microdurómetro y empleando como aproximación matemática la ecuación propuesta por Aoki [58]. Dado que esta técnica se aplicará en cada uno de los ensayos de durabilidad, la metodología empleada en este caso se explica más en detalle en un punto posterior.
- Tortuosidad. Es una medida de la complejidad geométrica de un medio poroso. Se trata de una tasa que caracteriza la difusión de fluidos a través de una estructura porosa. La fórmula es la siguiente:

$$\tau = \frac{V_i}{V_i - V_s}$$

- Grado de Anisotropía. Determinado a partir de la velocidad de transmisión de ultrasonidos en tres direcciones ortogonales (V_1 , V_2 y V_3), empleando para ello el equipo PUNDIT CNS Electronics, con una precisión de $0,1\mu\text{s}$ y usando la siguiente ecuación para la determinación de la anisotropía total descrita en [59]:

$$\text{dM}\% = [1 - (2V_1 / (V_2 + V_3))] \times 100$$

Según recientes estudios [60], cuanto mayor sea el grado de anisotropía y mayor sea la tortuosidad menor debe ser la durabilidad de un material.

- Índices de Durabilidad. La durabilidad de un material frente a la acción de agentes externos, tales como el agua o las sales solubles, se puede estimar de manera teórica mediante la aplicación de ecuaciones sencillas que dependen de las propiedades del material. En este trabajo se emplearon dos índices de durabilidad. El índice DDE propuesto por Ordoñez [61], que tiene en cuenta solamente el sistema poroso de un material, y el

índice EMDc propuesto por Benavente [62], que además del sistema poroso considera las propiedades mecánicas.

$$DDE (\mu m^{-1}) = \sum \left[\left(\frac{Dv(ri)}{ri} \right) Pa \right]$$

donde Dv es la distribución para cada poro, ri la cantidad de cada poro en tanto por uno y Pa la porosidad accesible al agua en tanto por uno. Para el cálculo de este estimador se utiliza el método de Rossi-Manaresi y Tucci [63] para definir los intervalos de tamaño de poro que hay que tener en consideración.

$$EMDc \left(\frac{m}{kg} \right) = 10 \cdot \left(\frac{DDE}{\sigma_c} \right)$$

Donde σ_c es la resistencia a compresión simple en MPa.

Teóricamente, cuanto mayor sea el valor de estos estimadores, menor será la durabilidad del material frente a ensayos de alteración acelerada como la cristalización de sales [62].

Un análisis más detallado y riguroso de las diferentes propiedades que caracterizan a los diferentes morteros empleados en este trabajo se recogen en el Trabajo de Fin de Grado del AF Hertfelder Chisvert, que precede al presente trabajo en la misma línea de investigación [49].

3.2.2 Ensayos de durabilidad

Con el objetivo de estudiar la durabilidad del mortero de cal aditivado con distintas cantidades de PCM frente a la agresión de agentes ambientales externos, se observaron las alteraciones del material frente a cambios bruscos de temperatura (choque térmico), la resistencia a ciclos por alteración de sales y las alteraciones del material frente a ciclos de hielo y deshielo.

Como veremos en todos estos ensayos, se llevó a cabo un seguimiento de la pérdida de masa de las probetas a lo largo de los ciclos, siguiendo un procedimiento de registro similar: registro del peso de cada una de las probetas al inicio y, cada cinco ciclos del experimento en cuestión, secando las probetas en una estufa ventilada a 75°C durante 24 horas hasta conseguir el peso seco. Después de esto se procedió a medir diferentes parámetros relativos a la consistencia mecánica de los diferentes morteros para analizar cómo evolucionaban sus propiedades estructurales (comparando el estado inicial con el analizado después de un determinado número de ciclos) y además establecer una comparativa entre los diferentes morteros analizados (materiales con distinta cantidad de PCM). De la misma manera se apuntaron los cambios macroscópicos observados a lo largo de los ciclos, apoyados por un registro fotográfico.

En concreto, en el presente trabajo se optó por realizar mediciones de los parámetros que se exponen tras la descripción de los ensayos de durabilidad (análisis termogravimétrico, termográfico y de dureza superficial) antes de iniciar cualquier tipo de experimento, cada cinco ciclos y al finalizar los diez ciclos (en caso de que las probetas aguantaran).

La descripción de los experimentos sería la siguiente:

1. **Choque térmico:** Como se comentaba anteriormente, en pocas palabras sería el estudio de las alteraciones que sufre el material cuando es expuesto a cambios bruscos de temperatura. En la realización de los ciclos se siguió una modificación de la norma UNE-EN 16140:2019: “Métodos de ensayo para la piedra natural. Determinación de la sensibilidad a los cambios en la apariencia producida por ciclos térmicos”. Se modifican los tiempos y tamaños de las muestras debido a los medios y tiempo disponible, quedando de la siguiente manera:
 - **Metodología:** Ciclos constituidos por un secado a 75°C durante 9 horas en una estufa ventilada, seguido inmediatamente de una inmersión completa en agua (con

el nivel de agua sobrepasando la altura de las probetas en 60 mm) a una temperatura aproximada de $20 \pm 5^\circ\text{C}$ durante 6 horas. En ambos casos las probetas se colocaron en posición vertical y distanciadas unas de otras y de la pared del recipiente más de 50mm. Se realizaron 10 ciclos y en los casos en que se interrumpió los ensayos durante algún día las probetas quedaron sumergidas en el agua según normativa.

- **Muestras:** Se utilizaron las probetas cilíndricas, 2 por cada tipo de mortero sumando un total de 6, guardando una probeta de cada tipo (3 en total) como referencia.

En la Figura 3-4 se pueden observar imágenes de las etapas de calentamiento en estufa y enfriamiento mediante inmersión en agua que conforman el ciclo de choque térmico.



Figura 3-4 Ciclos choque térmico

2. **Alteración por sales:** Este ensayo evalúa la resistencia de los morteros frente a la acción ejercida por las sales solubles. Se realiza simulando las tensiones que produce una sal determinada, en su proceso de cristalización/disolución, en el interior de los poros del material (en este caso una disolución de $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ al 14% en peso). Para llevar a cabo el experimento se siguió una modificación de la norma UNE-EN 12370: “Métodos de ensayo para la piedra natural. Determinación de la resistencia a la cristalización de sales”. El ensayo consistió en la realización de diez ciclos consistentes en:

- Inmersión parcial de las muestras de mortero durante 2 horas en la disolución.
- Secado a 60°C y 40% HR durante 2 horas.
- Enfriamiento a 20°C y 80% HR durante 1 hora.

Cada 5 ciclos los morteros fueron lavados con agua desionizada durante 24 horas para extraer las sales. También se colocó una malla en el fondo del recipiente que contenía la disolución para maximizar la superficie de contacto de la disolución con las probetas. La humedad relativa requerida en el enfriamiento se consiguió metiendo las probetas en una caja junto a un vaso de disolución saturada de Na_2SO_4 , que a 20°C genera una humedad relativa del 82% [64], como se puede observar en la Figura 3-5.



Figura 3-5 Inmersión en sales, secado y enfriamiento con HR del 80 % (izquierda a derecha)

3. Ciclos hielo-deshielo: Para la realización de este ensayo se siguió una modificación de la norma UNE-EN 12371: “Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la helacidad”. El objetivo de este experimento es, como el propio nombre de la norma indica, observar los cambios que se producen en el material tras estar expuesto a cambios bruscos de temperatura, los cuales abarcan la fusión/solidificación del agua. El objetivo propuesto era realizar diez ciclos, cada uno compuesto por:

- Saturación al vacío de las muestras de mortero con agua durante 2 horas.
- Congelación a -27°C durante 8 horas.
- Descongelación en agua a temperatura ambiente durante 4 horas.

En la Figura 3-6 se pueden observar las etapas de congelación en cámara frigorífica y descongelación en agua a temperatura ambiente que conforman el ciclo de hielo/deshielo.

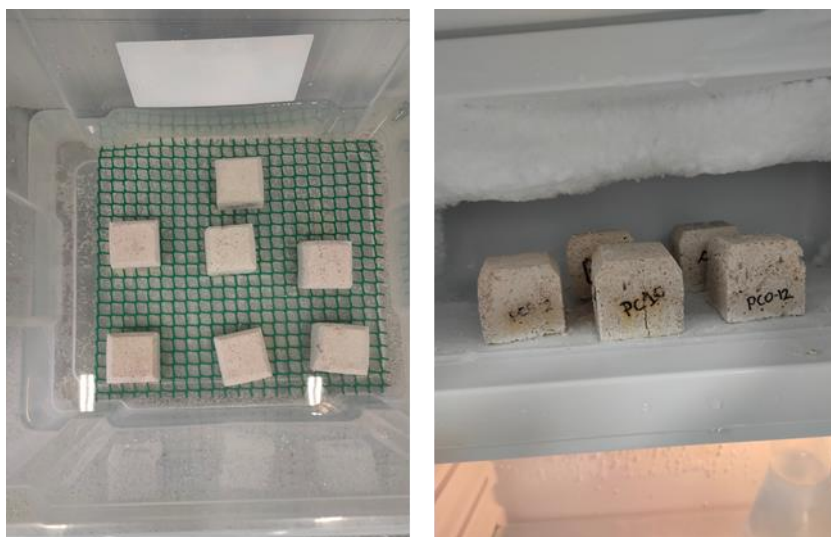


Figura 3-6 Ciclos hielo/deshielo

4. Ensayo a la intemperie: Por último y de manera experimental, con probetas sobrantes se decidió realizar un experimento lo más parecido a la exposición diaria que tendría el mortero en estudio en caso de que se le diera aplicación en obra. Al ser un experimento improvisado y orientativo no se siguió ninguna metodología concreta. El experimento consistió en colocar una muestra de cada tipo sobre un muro de hormigón a la intemperie y pegado al mar (Figura 3-7). De esta manera se observó, a lo largo de un periodo

ininterrumpido de dos semanas, el efecto de la lluvia, la variación de temperaturas y la sal marina sobre las probetas. Se observaron los cambios macroscópicos y se utilizó una cámara termográfica para sacar imágenes en diferentes condiciones.



Figura 3-7 Ensayo orientativo

3.2.3 Análisis termogravimétrico y calorimetría de barrido diferencial

Según la ICTAC (International Confederation for Thermal Analysis and Calorimetry), el análisis termogravimétrico (TGA) es una técnica en la que la masa de una muestra es monitorizada a lo largo del tiempo, mientras dicha muestra es sometida a unos ciclos programados de variación de temperatura. Esta técnica se realiza con el objetivo de analizar la pérdida o aumento de masa según se lleven a cabo ciclos de descomposición, evaporación, absorción, etc. Por otro lado, la calorimetría de barrido diferencial, DSC en inglés, es una técnica en la cual lo que se mide el flujo de calor procedente de o entrante a la muestra en función del tiempo o de la temperatura, estando la temperatura predeterminada en ciclos programados dentro de una atmósfera controlada. Lo que se mide es la diferencia entre flujos de calor de un crisol de referencia (vacío) y uno que contiene la muestra. Esta técnica es utilizada para analizar procesos endotérmicos/exotérmicos como lo son los cambios de fase [65].

Estos análisis se han llevado a cabo con el equipo termogravimétrico *Labsys Evo 1180* del laboratorio de mecánica, en el edificio de investigación del CUD. Dicho equipo se puede observar en la Figura 3-8, así como un ejemplo de los ciclos utilizados.



#		Initial T (°C)	Final T (°C)	S.r. (K/min)	Time (s)	Valves			TG Tare
1		20	20	0	300				☐
2		20	50	2	900				☐
3		50	20	2	900				☐
4		20	20	0	300				☐
5		20	50	2	900				☐
6		50	20	2	900				☐
7		20	20	0	300				☐
8		20	50	2	900				☐
9		50	20	2	900				☐

Figura 3-8 Labsys Evo 1180 y ejemplo de los ciclos utilizados

El *Labsys Evo 1180* está compuesto por una balanza y un horno donde tienen lugar los ciclos de calentamiento y enfriamiento. Este equipo cuenta con un ordenador con dos softwares instalados (*Acquisition* y *Processing*) en los cuales se programan los experimentos y se analizan los resultados.

El software *Acquisition* es el que controla el transcurso de todos los experimentos. Antes de iniciar cada experimento es necesario diseñar los ciclos de variación de temperatura a los que se quiere someter a la muestra. Para ello es necesario tener en cuenta el tiempo, la temperatura máxima y mínima de cada fase, las velocidades de calentamiento/enfriamiento, la refrigeración y el gas de barrido a emplear. Respecto al gas de barrido, en el presente trabajo se optó por utilizar un gas inerte como el nitrógeno, para evitar la oxidación de la muestra al estar en un crisol abierto.

El software *Processing* es el que se encarga del procesado y del análisis de los datos térmicos obtenidos por los instrumentos del software anterior. Una vez finalizado el experimento en el *Acquisition*, se exportan los datos a este software y se pueden analizar los datos con diferentes enfoques, dependiendo del punto de vista que se quiera exponer. De esta manera se consigue obtener conclusiones a partir de los datos mostrados, tales como flujos de calor, variaciones de masa y entalpías, ya sea en función del tiempo o de la temperatura [51].

Metodología para análisis de probetas en *Labsys Evo 1180*

En pocas palabras, el funcionamiento de este equipo se resume en someter a las muestras introducidas a determinados ciclos de variación de temperatura, analizando el flujo de calor, la pérdida de masa de la muestra y las temperaturas tanto de la muestra como del horno. Por lo tanto, uno de los principales elementos de este equipo, que es de especial interés para el presente trabajo, es el ciclo programado de temperaturas al que se someten las muestras. En este caso se optó por realizar un ciclo que se repita 3 veces para poder descartar la primera repetición, que suele ser menos precisa, y con un objetivo principal: observar la variación de las propiedades a lo largo de tiempo (estabilidad cíclica) y así poder comprobar si el mortero es válido para un uso continuado.

El ciclo en cuestión está compuesto de 3 tramos. El primero es una estabilización a 20°C durante 5 minutos, seguido de un calentamiento hasta 50°C a ritmo de 2°C/min, sumando un tiempo total de 15 minutos. Por último, un enfriamiento por el cual la muestra regresa a los 20°C al mismo ritmo que se llevó en el calentamiento, al que seguiría una nueva estabilización a 20°C antes de volver a calentarse por segunda vez. El resumen de este ciclo queda reflejado anteriormente en la Figura 3-8, así como se puede observar en la Figura 3-9 una gráfica representativa de uno de los tramos que componen el ciclo.

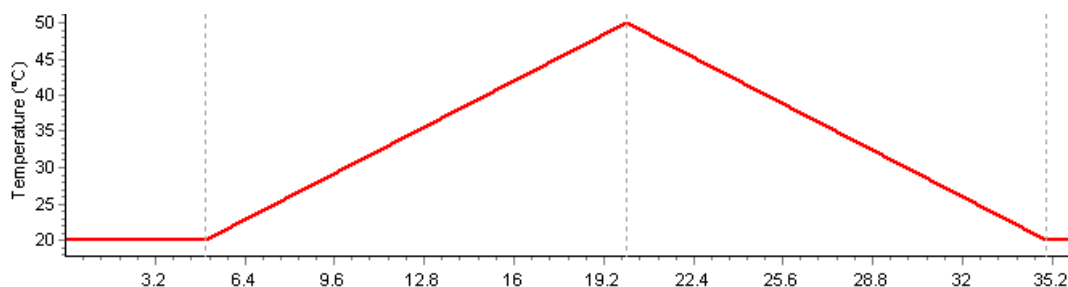


Figura 3-9 Ejemplo de tramos que componen el ciclo

Se sometió a estos ciclos al crisol vacío (como referencia) y a muestras extraídas de las probetas sin PCM, con un 5% y con un 10% de PCM. El patrón seguido para el análisis de cada una de ellas fue el siguiente:

- Extraer muestras del interior de las probetas (menor carbonatación).
- Abrir el horno del TG y sacar el crisol de alúmina con ayuda de las pinzas.
- Utilizando una balanza de alta precisión, pesar el crisol y tarar la báscula.
- Introducir la muestra en el crisol e ir ajustando para conseguir entre 8 y 14 miligramos.

- Trasladar el crisol de vuelta al laboratorio e introducirlo en el TG.
- Cerrar el horno, abrir la toma de agua con un caudal de 2 L/min y abrir la bombona de nitrógeno (que es el gas de barrido que se utilizará).

Una vez terminado el análisis de cada probeta, se extrae el crisol del horno y se limpia con ayuda de las pinzas y una disolución de ácido clorhídrico diluida al 10%. Tras ello, se deja secar el crisol hasta que se utilice de nuevo.

3.2.4 Análisis termográfico

El análisis termográfico se realizó con el objetivo de estudiar el efecto de la adición de PCM a morteros de cal en cuanto a conductividad térmica. Para ello se utilizó una cámara termográfica, la cual registra la intensidad de la radiación en la zona infrarroja del espectro electromagnético y la convierte en una imagen visible sin necesidad de contacto [66]. Más concretamente, se utilizó una cámara termográfica FLIR i7 (Véase Figura 3-10). En el Anexo V: Ficha Técnica FLIR i7 se encuentran detalladas sus especificaciones técnicas, pero sus características principales son las siguientes [67]:

- Rango de temperatura entre 0°C y 250°C.
- Emisividad de 0,1 a 1,0 (ajustable).
- Rango espectral entre 7,5 μm y 13 μm .
- Sensibilidad térmica <0,1°C a 25°C.

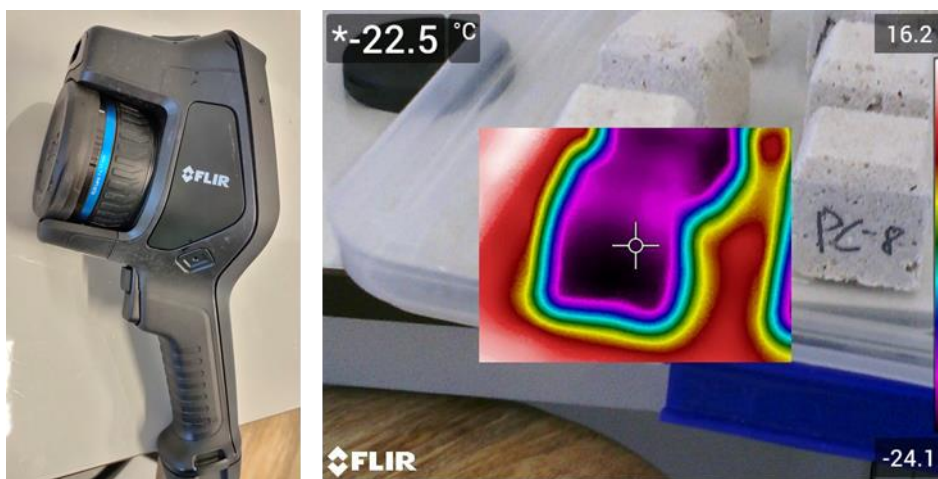


Figura 3-10 Cámara FLIR y ejemplo de imagen

Para realizar este ensayo se utilizó una muestra de cada composición (sin PCM, 5% PCM, 10% PCM) de las probetas cilíndricas. Para poder observar las posibles variaciones en conductividad entre muestras con distinta composición primero se sometió a las probetas a un calentamiento en la estufa ventilada a 80°C durante 3 horas. Tras ello, se procedió a colocar las muestras sobre un lecho de agua en una bandeja. Para incrementar la superficie de absorción se colocó una malla entre la bandeja y la muestra.

Por último, se fueron tomando imágenes con la cámara termográfica a lo largo del enfriamiento hasta que la temperatura se hubiera estabilizado, para posteriormente realizar informes con las herramientas *Flir Tools+* y *Flir Report Studio*.

3.2.5 Análisis de dureza superficial

Para estudiar la evolución de la dureza superficial se utilizó un durómetro *PCE-2500* (Véase Figura 3-11). Dada la sofisticación de dicho instrumento y la dificultad que supone sacar una sola medición exacta, se siguió el método ASTM D 5873: “*Determination of Rock Hardness by Rebound*

Hammer Method” [68]. Este método requiere 10 mediciones, de las cuales se calculará una media. Los datos que diverjan más de 7 unidades de la media calculada se desprecian y se vuelve a calcular una media de los valores restantes.



Figura 3-11 Dureza superficial con durómetro PCE-2500

El principio por el que se rigen este tipo de medidas es el denominado *Equotip (Energy Quotient and Tip)*. Este método de medida fue desarrollado por Dietmar Leeb en 1975 y se basa en el lanzamiento de un cuerpo de impacto impulsado por un resorte contra una superficie de prueba. Las velocidades de impacto y retroceso (V_i y V_r) se miden y se procesan para convertirlas en el valor de dureza L (Escala Leeb, HLD), mediante la siguiente ecuación y reflejado en la Figura 3-12:

$$L = 1000 \times (V_r \div V_i)$$

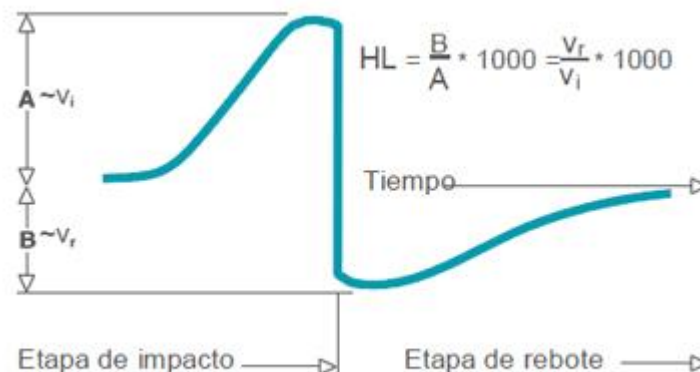


Figura 3-12 Principio físico de Equotip

El valor de la dureza obtenida por *Equotip* se puede predecir con la medición de la resistencia de compresión uniaxial (UCS en inglés), la cual viene determinada por la fuerza de la muestra. Esta UCS es el esfuerzo de compresión axial máximo que puede tolerar una muestra cilíndrica recta de material antes de fracturarse [69]. Por lo tanto, se pueden relacionar las medidas de dureza superficial en escala de Leeb con el UCS mediante la ecuación de Aoki, como se observa a continuación [58]:

$$UCS \text{ (MPa)} = 0,079e^{-0,039n} L_s^{1,1}$$

Donde n es la porosidad (% accesible al mercurio) y L_s es el valor de la dureza de Equotip.

4 RESULTADOS

4.1 Caracterización del mortero de cal

A continuación, se puede observar en la Tabla 4-1 un resumen de las principales propiedades de los morteros empleados en este estudio.

Propiedades	PCM0	PCM5	PCM10
Porosidad accesible al H₂O (%)	19,7 ±0,56	22,99 ± 0,20	21,98 ± 1,16
Porosidad accesible al Hg (%)	26,81	30,2	20,27
Porosidad capilar (%)	18 ±4,24	18,25 ± 4,6	15,75 ± 4,6
Tortuosidad	1,81	1,49	3,1
Grado de anisotropía dM%	1,88	4,92	5,57
Resistencia a Compresión (MPa)	10,51±0,52	8,15±0,03	12,17±0,04
DDE (µm-1)	0,059	0,072	0,006
EMFc (m/kg)	0,004	0,006	0,001

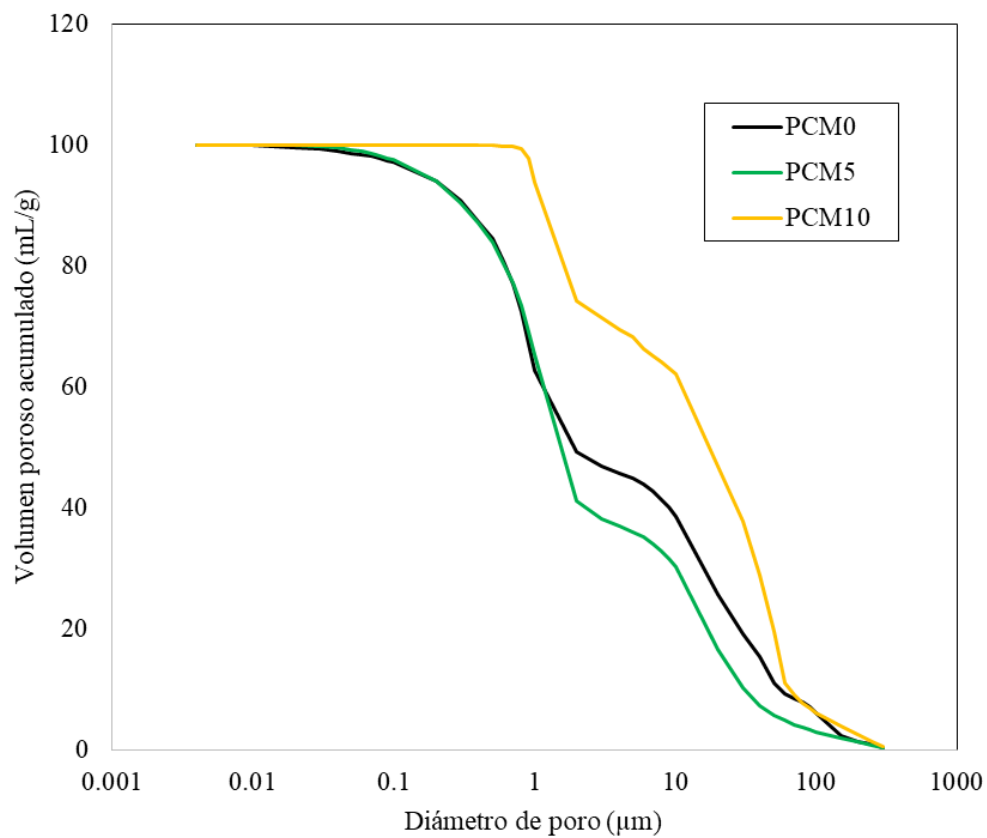
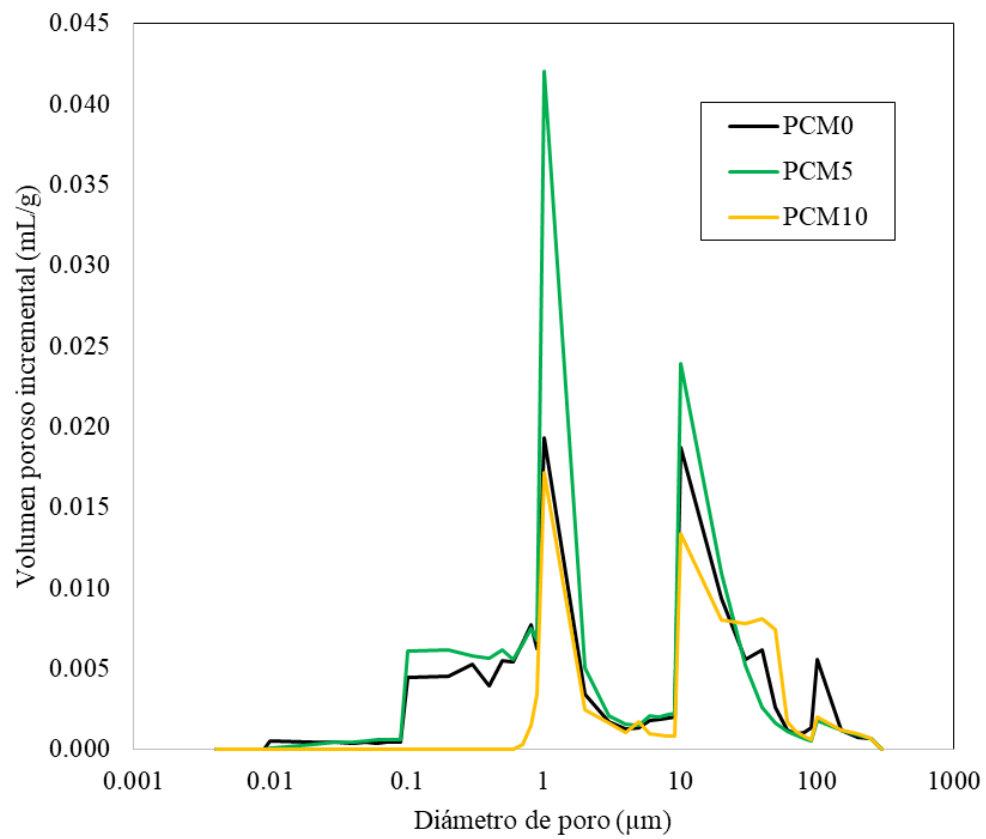
Tabla 4-1 Principales propiedades de los tres tipos de mortero (elaboración propia basado en [70])

Una vez establecidas estas propiedades, se comentan a continuación algunas de las implicaciones que tendrán los valores calculados.

En lo que concierne a la porosidad accesible al agua de los diferentes morteros evaluados se aprecia que la adición de PCM incrementa la porosidad accesible al agua. Especialmente notorio es este cambio cuando el grado de dosificación es bajo (5%).

Con respecto a la porosidad accesible al mercurio, se aprecia que el grado de dosificación del PCM afecta a la porosidad. Mientras que una adición de un 5% ha permitido aumentar sustancialmente la porosidad accesible al mercurio (30,2% con respecto al 26,81% del PCM0), un aumento excesivo, en este caso de un 10%, ha reducido esta porosidad (20,27%). Esta reducción, especialmente notoria se debe, tal y como se ve en la

, a que una adición excesiva implica que desaparezcan los poros con diámetro de acceso inferior a 1µm.



Gráfica 4-1 Volumen poroso acumulado en función del diámetro de poro

Comparando ambas porosidades accesibles, agua y mercurio, se aprecia que tanto para el mortero PCM0 como para el mortero PCM5, la porosidad accesible al mercurio es superior al agua, lo que indica que en ambos morteros hay un cierto volumen de poros con diámetro de acceso inferior a $0,1\mu\text{m}$, correspondiente a poros que no son accesibles al agua (esto mismo se aprecia en la Gráfica 4-1, donde esta familia representa un 2,7% aproximadamente en los morteros PCM0 y PCM5). Por el contrario, el mortero PCM10 presenta un valor de porosidad accesible al agua superior al de mercurio, esto indica que en este mortero existen poros con diámetro de acceso superior al tamaño que es capaz de determinar el porosímetro ($360\mu\text{m}$)

Analizando la porosidad capilar, se observa que, tanto el mortero PCM0 como el mortero PCM5 muestran un valor similar mientras que el mortero PCM10 presenta una menor porosidad en este aspecto. Nuevamente este resultado se relaciona con el menor volumen poroso existente entre $0,1-100\mu\text{m}$ [56], correspondientes al volumen de acceso capilar ($0,169\text{mL/g}$ PCM5, $0,135\text{mL/g}$ PCM0 y $0,082\text{mL/g}$ PCM10). En las gráficas de absorción capilar que se pueden observar en el TFG de Hertfelder [70], se aprecia que el mortero PCM5 absorbe al final del ensayo una mayor cantidad de agua por capilaridad y a una mayor velocidad que lo que lo hace el mortero PCM0 (12,55% frente al 11,27% respectivamente), mientras que el mortero que menos absorbe es el PCM10 (10,60%).

Con respecto a la tortuosidad y a la anisotropía, parámetros que influyen en la durabilidad de un material de construcción, los resultados son dispares. Mientras que la anisotropía aumenta con la dosificación del PCM, la tortuosidad no sigue la misma tendencia. En este caso, el mortero que presenta una mayor tortuosidad es el PCM10, pero el que presenta una menor tortuosidad es el PCM5.

Analizando la resistencia a compresión, calculada mediante la fórmula de Aoki [58], se aprecia que los morteros que presentan una mayor resistencia son aquellos que presentan una menor porosidad (especialmente el mortero PCM10). Este resultado concuerda con estudios previos donde se indica que a menor porosidad mayor es la resistencia a compresión de un material de construcción ya que los poros actúan como concentradores de tensiones [71] [72] [73].

Finalmente, los estimadores matemáticos, incluidos en este trabajo, para determinar teóricamente la durabilidad de los morteros empleados frente a la acción de agentes agresivos externos, concretamente frente a la acción de sales solubles, indican lo mismo. Ambos estimadores (DDe y EMFc) muestran que el mortero menos durable es el PCM5 seguido del PCM0. Esto se debe principalmente a la importancia que tienen en estos estimadores la existencia de un volumen poroso con tamaño de acceso pequeño, ya que el daño ocasionado por las sales es mayor en materiales que presentan microporosidad, entendida ésta como aquellos poros con radios de acceso inferior a $2.5\mu\text{m}$ [74] y en especial es alto en poros con tamaño de acceso inferior a $1\mu\text{m}$ [62].

4.2 Ensayos de durabilidad

El objetivo de los ensayos de durabilidad es observar el comportamiento de los morteros aditivados con PCM en distinta proporción frente a la exposición de agentes agresivos externos (como son las sales solubles) y frente a condiciones ambientales extremas (choque térmico y hielo/deshielo), para así evaluar su idoneidad a la hora de aplicarlos en obra.

Se llevó a cabo un seguimiento de la pérdida de masa de las probetas a lo largo de los ciclos. Para ello se pesaban las probetas al inicio y, cada cinco ciclos del experimento en cuestión, secando las probetas en una estufa ventilada a 75°C durante 24 horas hasta conseguir el peso seco y se procedía a medir dichos parámetros para compararlos con los iniciales (referencia) y entre sí (materiales con distinta cantidad de PCM). De la misma manera se apuntaron los cambios macroscópicos observados a lo largo de los ciclos, apoyados por un registro fotográfico.

Cada cinco ciclos, se determinó además la dureza superficial de los distintos tipos de probetas elaboradas, con el objeto de analizar cómo evoluciona la dureza superficial de las probetas, y relacionar los valores obtenidos de dureza superficial con la resistencia a compresión uniaxial

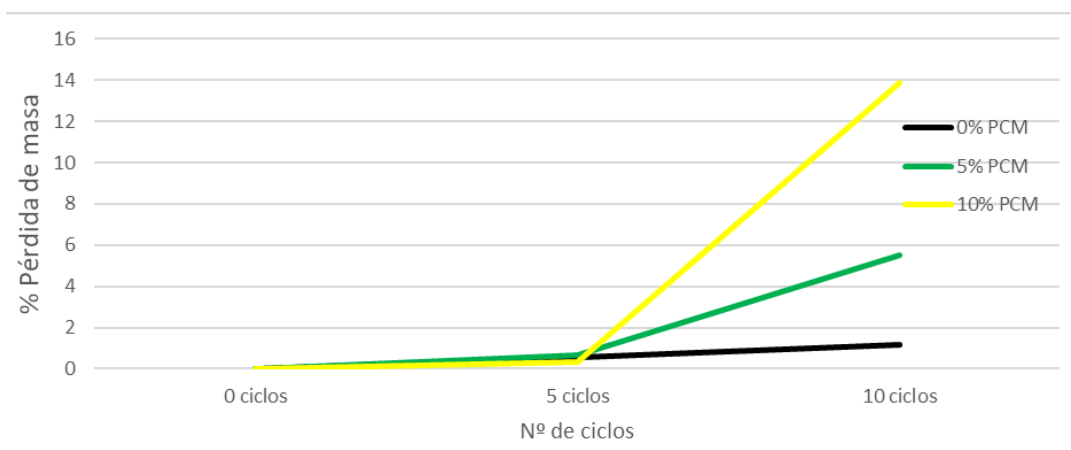
mediante la ecuación descrita en el apartado 3.2.5., empleando el método para la adquisición de valores de dureza superficial fue el ASTM D 5783.

1. **Choque térmico:** En la Tabla 4-2 se puede observar la monitorización que se llevó del peso de las diferentes muestras al inicio, tras realizar 5 ciclos y al finalizar los 10 ciclos previstos, así como se indica la pérdida de masa tras 5 ciclos y la acumulada tras 10 ciclos.

Muestra	Peso Inicial (g)	Peso 5 ciclos (g)	Peso 10 ciclos (g)	Pérdida 5 ciclos (%)	Pérdida 10 ciclos (%)
PCM0-8	511,17	509,85	506,77	0,26	0,86
PCM0-9	516,75	512,42	509,08	0,84	1,48
PCM5-6	467,09	462,65	439,8	0,95	5,84
PCM5-8	471,36	469,33	447,03	0,43	5,16
PCM10-4	487,52	486,29	437,58	0,25	10,24
PCM10-6	486,41	484,33	401,07	0,43	17,54

Tabla 4-2 Registro de pesos en ciclos de choque térmico

En la Gráfica 4-2 se puede observar un diagrama en el que se expone la evolución en masa de cada muestra, representando por cada una su peso inicial, tras 5 ciclos y el peso final. Se extrae de dichos datos que los que sufrieron menor pérdida fueron las probetas sin adición de PCM, rondando las pérdidas totales el 1% del peso inicial. Ambas muestras de PCM5 experimentaron una pérdida total similar en torno a un 5,5% aproximadamente. Los resultados más desfavorables se observan en el mortero PCM10, con unas pérdidas de masa de entre 10%, 24% y 17,54%.



Gráfica 4-2 Pérdida de masa en ciclos de choque térmico

De acuerdo con las pérdidas de masa y la Figura 4-1 se puede observar que, además de la mayor pérdida de masa en las que contenían un 10% de PCM, dichas muestras sufrieron notables fracturas y oquedades, seguidas de las muestras de PCM5 donde se comenzaban a ver fracturas en la parte superior. Estos resultados se deben a los continuos procesos de fusión-solidificación del PCM que están teniendo lugar al pasar continuamente por ciclos de cambio de estado. Las presiones internas que el PCM al solidificar ejerce contra las paredes de los poros guarda similitud con los procesos de daños por sales, donde las presiones internas generan fracturas en el material, tanto por la propia presión que ejercen como por posibles incrementos de volumen que pueden tener lugar durante el proceso de cristalización. En este caso el mortero más afectado es el mortero con un mayor contenido de PCM en su composición.



Figura 4-1 Aspecto de las muestras tras 10 ciclos

Además, el motivo por el que las fracturas comienzan por la parte superior guarda relación con la forma a la cual se produce la evaporación del agua. En todos los casos la evaporación comienza por la parte superior produciéndose un secado más rápido en esta zona y un movimiento de agua gravitacional hacia la parte inferior que tiende a secar más lento. Esto ocasiona que en la parte superior el PCM solidifique antes y comience a generar tensiones antes en esta zona.

DATOS INICIALES			5 CICLOS			10 CICLOS		
0%	5%	10%	0%	5%	10%	0%	5%	10%
198	224	217	197	198	200	219	202	x
204	203	195	208	202	204	204	199	
224	200	200	197	218	212	196	208	
201	222	206	202	243	202	210	202	
198	204	306	196	194	196	195	212	
194	205	252	199	195	197	198	197	
201	206	202	212	197	216	211	198	
204	245	201	228	213	207	194	207	
235	200	199	197	202	209	200	218	
206	210	217	213	202	199	228	207	
MEDIAS	206,5	211,9	219,5	204,9	206,4	204,2	205,5	205

Tabla 4-3 Medidas de dureza de cada muestra y media aritmética (choque térmico)

En la Tabla 4-3 se observan las 10 medidas realizadas a cada tipo de muestra al inicio, tras 5 ciclos y tras finalizar el ensayo (10 ciclos), así como la media aritmética de las mismas. A partir de dicha media, se obtienen los valores de dureza que se observan en la Tabla 4-4, siguiendo el método de la norma ASTM. Cabe destacar que no se pudieron tomar medidas para las muestras con 10% de PCM tras los 10 ciclos debido a la entidad de las fracturas que presentaban.

DUREZA SUPERFICIAL				RESISTENCIA COMPRESIÓN (MPa)		
Muestra	Inicial	5 ciclos	10 ciclos	Inicial	5 ciclos	10 ciclos
PCM0	203,20	203,00	206,25	9,60	9,59	9,76
PCM5	207,00	204,75	204,38	9,80	9,68	9,66
PCM10	217,00	203,50	0,00	10,32	9,62	0,00

Tabla 4-4 Relación entre dureza y resistencia a compresión (choque térmico)

Se puede observar que la mayor disminución de la resistencia de los morteros se produjo en los morteros con 10% de PCM seguido del mortero con un 5%. El mortero sin PCM no se ve afectado por estos ciclos.

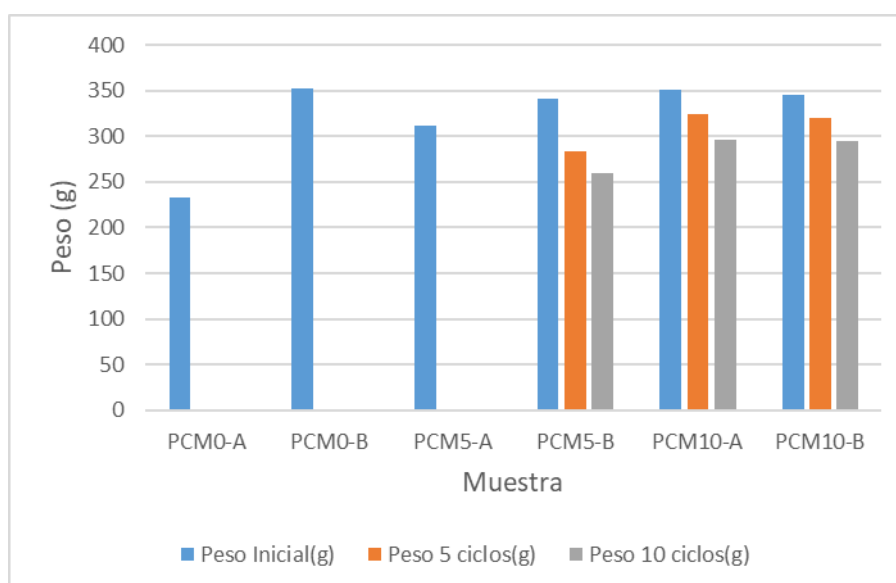
2. Alteración por sales: En la Tabla 4-5 se puede observar la monitorización que se realizó del peso de todas las muestras a lo largo del ensayo de alteración por sales solubles, tomando datos al inicio, tras 5 ciclos y una vez finalizado el ensayo (10 ciclos).

Muestra	Peso Inicial(g)	Peso 5 ciclos(g)	Peso 10 ciclos(g)	Pérdida 5 ciclos (%)	Pérdida 10 ciclos (%)
PCM0-A	233	0	0	0,00	0,00
PCM0-B	352	0	0	0,00	0,00
PCM5-A	311,5	0	0	0,00	0,00
PCM5-B	341	284,03	259,79	16,71	23,82
PCM10-A	350,5	324,28	295,97	7,48	15,56
PCM10-B	345,5	320,78	294,82	7,15	14,67

Tabla 4-5 Registro de pesos en ciclos de alteración por sales

Los resultados indican que la adición de PCM mejoró la resistencia a las sales solubles, ya que las muestras sin PCM fueron las primeras en fallar, no llegando a cumplir 5 ciclos. Esta mejora fue mayor a mayor dosificación de PCM (PCM10). De las muestras con un 5% de PCM sólo una completó el ensayo con una pérdida de masa del 23,8%. Sin embargo, las muestras con un contenido del 10% de PCM finalizaron ambas el ensayo con una pérdida de masa entre 14,67% y 15,56%. Estos resultados guardan relación: 1) con la mayor porosidad capilar del mortero. A mayor porosidad capilar y mayor porosidad accesible, mayor es el contenido de sales que pueden penetrar en el mortero (en este caso morteros PCM5 y PCM0) y 2) con el tamaño y distribución de los poros. Las presiones que ejercen las sales son mayores cuando cristalizan en el interior de poros pequeños, de los que el PCM10 carece, sobre todo cuando se trata de una sal tan nociva como es la del sulfato de sodio que tras procesos de hidratación puede incrementar su volumen un 300% [56] [57].

En la Gráfica 4-3 se ilustra la evolución del peso de cada muestra a lo largo del ensayo mediante un diagrama de barras.



Gráfica 4-3 Evolución de pesos en ciclos de alteración por sales

A continuación, se muestra la parte de interés del registro fotográfico llevado a lo largo del ensayo, como apoyo a los cambios macroscópicos observados. En la Figura 4-2; **Error! No se encuentra el**

origen de la referencia. se muestra el estado final de las muestras que completaron el ensayo (PCM5-B, PCM10-A y PCM10-B) y en la Figura 4-3 se destaca el patrón de desgaste que mostraban las muestras, grandes oquedades en la base que comprometían la estructura hasta derrumbarse



Figura 4-2 Estado final de las probetas en ciclos de sales (PCM5-B, PCM10-A, PCM10-B)



Figura 4-3 Patrón de rotura (PCM10-A, PCM10-B, PCM5-B y PCM0-B)

En la Tabla 4-6 y la Tabla 4-7 se muestran las medidas de dureza superficial tomadas con el microdurómetro para cada muestra a lo largo del ensayo y la relación entre dicha dureza y la resistencia a compresión.

DATOS INICIALES			5 CICLOS			10 CICLOS		
0%	5%	10%	0%	5%	10%	0%	5%	10%
195	222	203	0	206	223	0	197	206
196	195	231		205	197		198	208
218	211	195		208	208		210	208
195	212	196		196	200		208	195
196	209	223		202	206		196	214
231	197	195		198	200		206	197
225	223	230		212	199		210	198
202	237	208		208	214		194	197
243	213	205		198	204		209	196
207	196	228		214	198		196	212
MEDIAS	210,8	211,5	0	204,7	204,9	0	202,4	203,1

Tabla 4-6 Medidas de dureza y media aritmética (ciclo de sales)

DUREZA SUPERFICIAL				RESISTENCIA COMPRESIÓN (MPa)		
Muestra	Inicial	5 ciclos	10 ciclos	Inicial	5 ciclos	10 ciclos
0% PCM	207,00	203,57	0,00	9,80	9,62	0,00
5% PCM	211,25	204,62	201,43	8,78	8,48	8,33
10% PCM	206,50	202,14	202,33	12,61	12,32	12,33

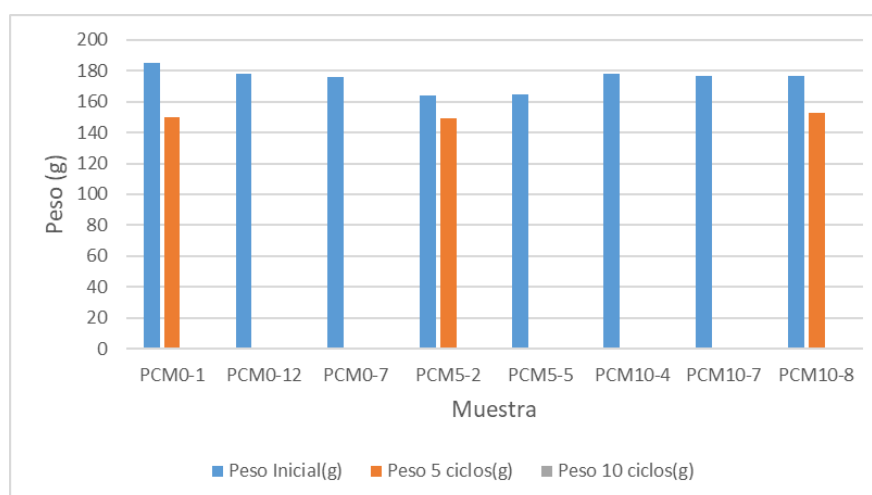
Tabla 4-7 Relación entre dureza y resistencia a compresión (alteración por sales)

De los datos obtenidos con el microdurómetro, y su equivalencia en RCS, se aprecia que la muestra que apenas ha sufrido cambios en sus propiedades es el mortero PCM10 que es el que carece de poros inferiores a 1µm y presenta una menor porosidad

3. Ciclos hielo/deshielo: Como podemos observar en la Tabla 4-8, sólo una muestra de cada tipo llegó a cumplir los 5 ciclos y ninguna de ellas alcanzó los 10 ciclos. Las pérdidas en masa fueron relativamente similares en dichas muestras, siendo la menos afectada la aditivada con un 5% de PCM y la que más aquella que no contenía PCM. Estas muestras perdieron un 9% y un 19% de su masa inicial, respectivamente. En la Gráfica 4-4 se representa la evolución de las masas de las probetas mediante un diagrama de barras.

Muestra	Peso Inicial(g)	Peso 5 ciclos(g)	Peso 10 ciclos(g)	Pérdida 5 ciclos	Pérdida 10 ciclos
PCM0-1	185	150,08	0	34,92	0
PCM0-12	178	0		0	
PCM0-7	176	0		0	
PCM5-2	164	149,37		14,63	
PCM5-5	164,5	0		0	
PCM10-4	178	0		0	
PCM10-7	176,5	0		0	
PCM10-8	176,5	152,57		23,93	

Tabla 4-8 Registro de pesos en ciclos de hielo/deshielo



Gráfica 4-4 Evolución de los pesos en ciclos de hielo/deshielo

A medida que se realizaron los ciclos se anotaron las siguientes observaciones:

- Se consiguió pesar la muestra PCM0-1 tras 5 ciclos, pero rompió al instante (Figura 4-4)
- La primera en romper fue PCM0-7 tras finalizar el 2º ciclo.
- Las muestras PCM0-12 y PCM10-7 se rompieron tras el cumplimiento del tercer ciclo.
- PCM10-4 se rompió al finalizar el 4º ciclo.
- Dos muestras de las que pasaron el 5º ciclo, PCM5-2 y PCM10-8, la primera rompió al primer golpe del durómetro y la segunda aguantó varias mediciones, pero no terminó el ensayo (Figura 4-4).
- La muestra PCM5-5 se rompió accidentalmente.
- Como norma general, la inmensa mayoría de las fracturas comenzaron por notables oquedades en la base de las muestras (Figura 4-5).



Figura 4-4 Roturas de PCM10-8 y PCM0-1



Figura 4-5 Patrón de rotura más común en ciclos hielo/deshielo

En la Tabla 4-9 y la Tabla 4-10 se muestran los valores de dureza superficial (HLD), el método de cálculo y la relación con la resistencia a compresión.

	DATOS INICIALES			5 CICLOS			10 CICLOS		
	0%	5%	10%	0%	5%	10%	0%	5%	10%
	202	194	212	x	x	215	x		
	198	204	217			196			
	204	203	195			204			
	204	200	200			198			
	201	212	206			199			
	193	204	206			227			
	194	197	207			204			
	201	206	202			196			
	204	218	201			x			
	205	196	199			x			
MEDIAS	200,6	203,4	204,5			204,9			

Tabla 4-9 Medidas de cada muestra y media aritmética (hielo/deshielo)

DUREZA SUPERFICIAL				RESISTENCIA COMPRESIÓN (MPa)		
Muestra	Inicial	5 ciclos	10 ciclos	Inicial	5 ciclos	10 ciclos
0% PCM	201,44	0,00	0,00	9,51	0,00	0,00
5% PCM	202,33	0,00	0,00	8,37	0,00	0,00
10% PCM	203,00	201,25	0,00	12,38	12,26	0,00

Tabla 4-10 Relación entre dureza y resistencia de compresión (hielo/deshielo)

4. Ensayo a la intemperie: Durante las dos semanas que las muestras estuvieron expuestas a la intemperie, los factores climatológicos variaron considerablemente, lo que fue beneficioso para estudiar la reacción ante distintos escenarios. En dicho periodo de tiempo hubo varios días con precipitaciones y días con buena irradiación solar y contrastes térmicos, además de la inmediata cercanía al agua del mar.

En cuanto a resultados, los cambios macroscópicos fueron casi inexistentes, mostrando las muestras el mismo aspecto que cuando se comenzó el ensayo. Además, se tomó una imagen termográfica un día en el que las temperaturas oscilaron entre 11°C y 21°C, a las 17:00h. La imagen se centró en la muestra con 10% de PCM por ser la que presentaba un mayor contraste térmico, que se muestra en la Figura 4-6.

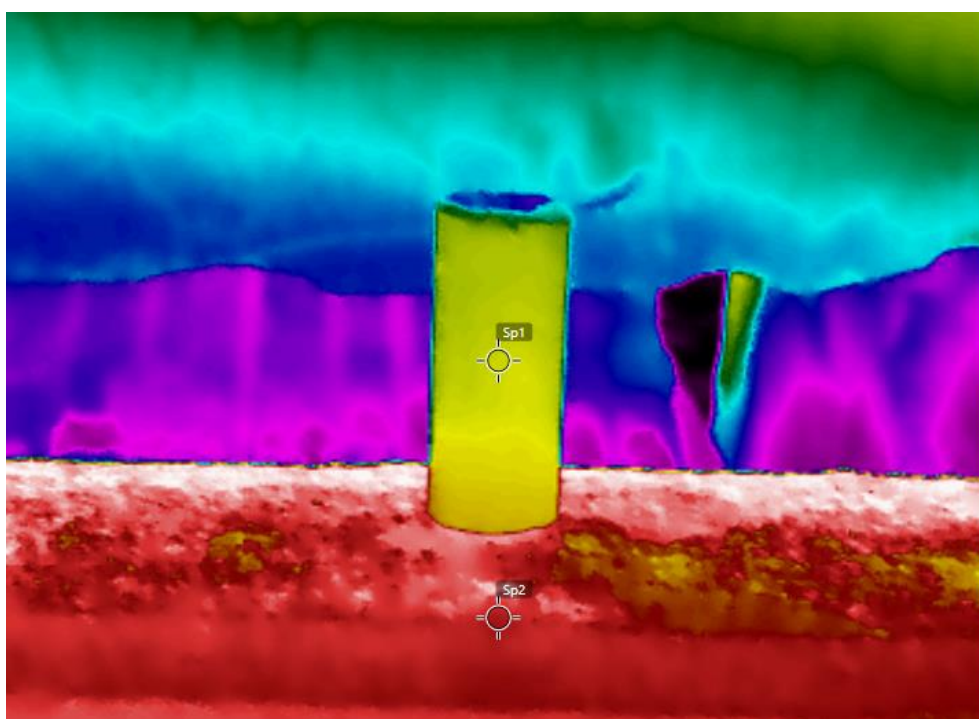


Figura 4-6 Contraste térmico PCM10 a la intemperie

Teniendo el marcador del centro de la muestra una temperatura de 18°C y el del muro de hormigón una temperatura de 21,5°C, se observa que además de aguantar los factores climatológicos en un periodo de 2 semanas, el PCM aportó una notable mejora en cuanto a reducción de las oscilaciones térmicas del mortero.

4.3 Análisis termogravimétrico y calorimetría de barrido diferencial

El objetivo del análisis termogravimétrico es monitorizar la variación de masa de las diferentes muestras, sometidas a unos ciclos específicos (Véase 3.2.3) que hacen que la temperatura de la muestra sobrepase el punto de fusión del PCM en repetidas ocasiones. En cuanto a la calorimetría de barrido diferencial, se pretende observar el flujo térmico en la muestra durante dichos ciclos, especialmente en los puntos que el PCM pasa su punto tanto de fusión como de solidificación.

Las temperaturas máxima y mínima del ciclo se establecen por encima y por debajo de la temperatura de cambio de fase del PCM, temperaturas que se asemejan a las que puede alcanzar una fachada durante el verano, poniendo los resultados en un contexto directo de aplicación al entorno en el que se realiza el presente trabajo.

Tal y como se comenta en el apartado 3.2.3, es necesario someter al crisol (de alúmina) a los mismos ciclos que a las muestras, con el objetivo de crear una referencia que poder restar al posterior análisis de las muestras. De esta manera, una vez se les resta a los resultados de las muestras la referencia obtenida con el crisol, se extraen análisis que representan con precisión los resultados de la muestra a analizar y no los que son resultado del análisis de crisol y muestra en conjunto.

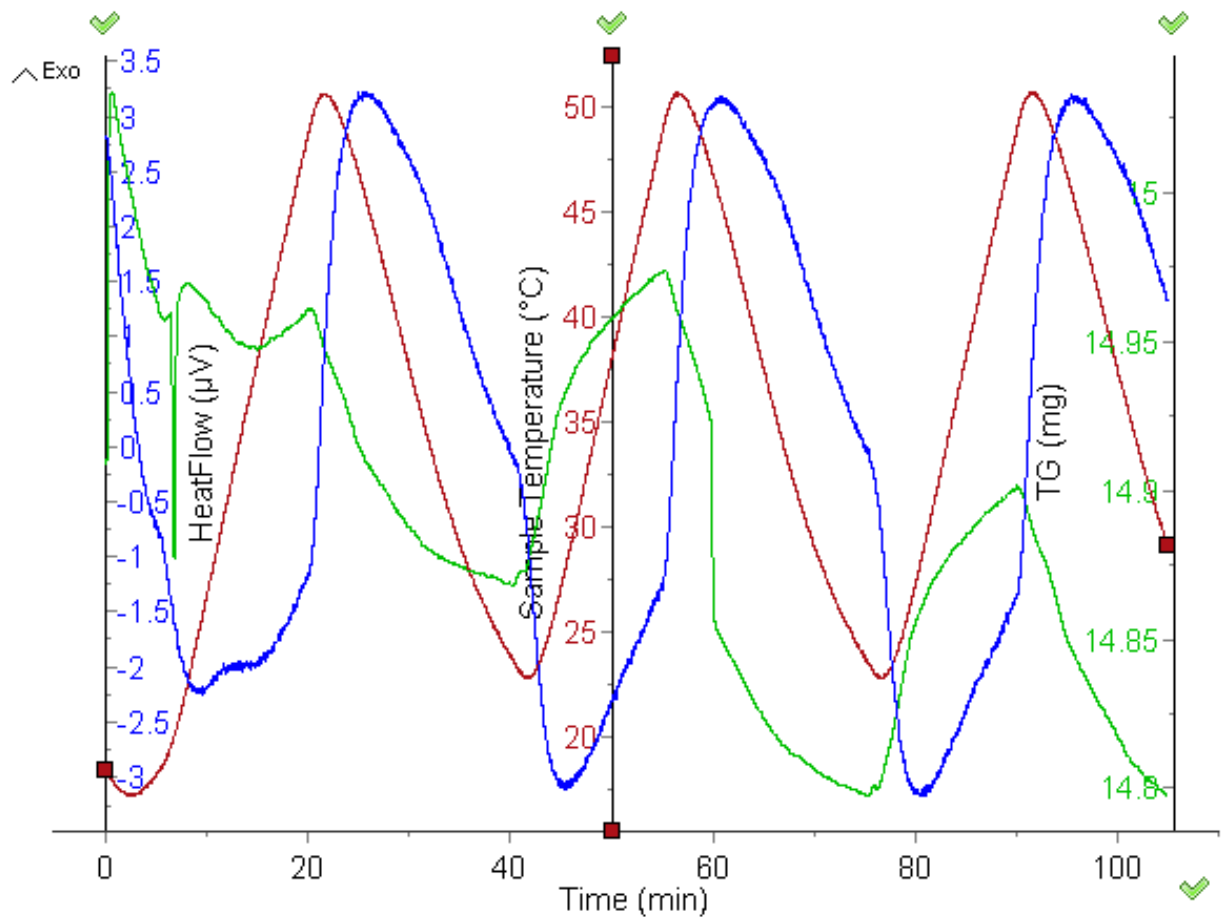
Para poder analizar las gráficas correctamente, es necesario saber a qué corresponde cada línea:

- línea roja: temperatura de la muestra a lo largo de todo el proceso, la cual se ajusta a las temperaturas establecidas en el ciclo.
- línea verde: variación en masa de la muestra a lo largo del ciclo.
- línea azul: flujo de calor desde o hacia la muestra.

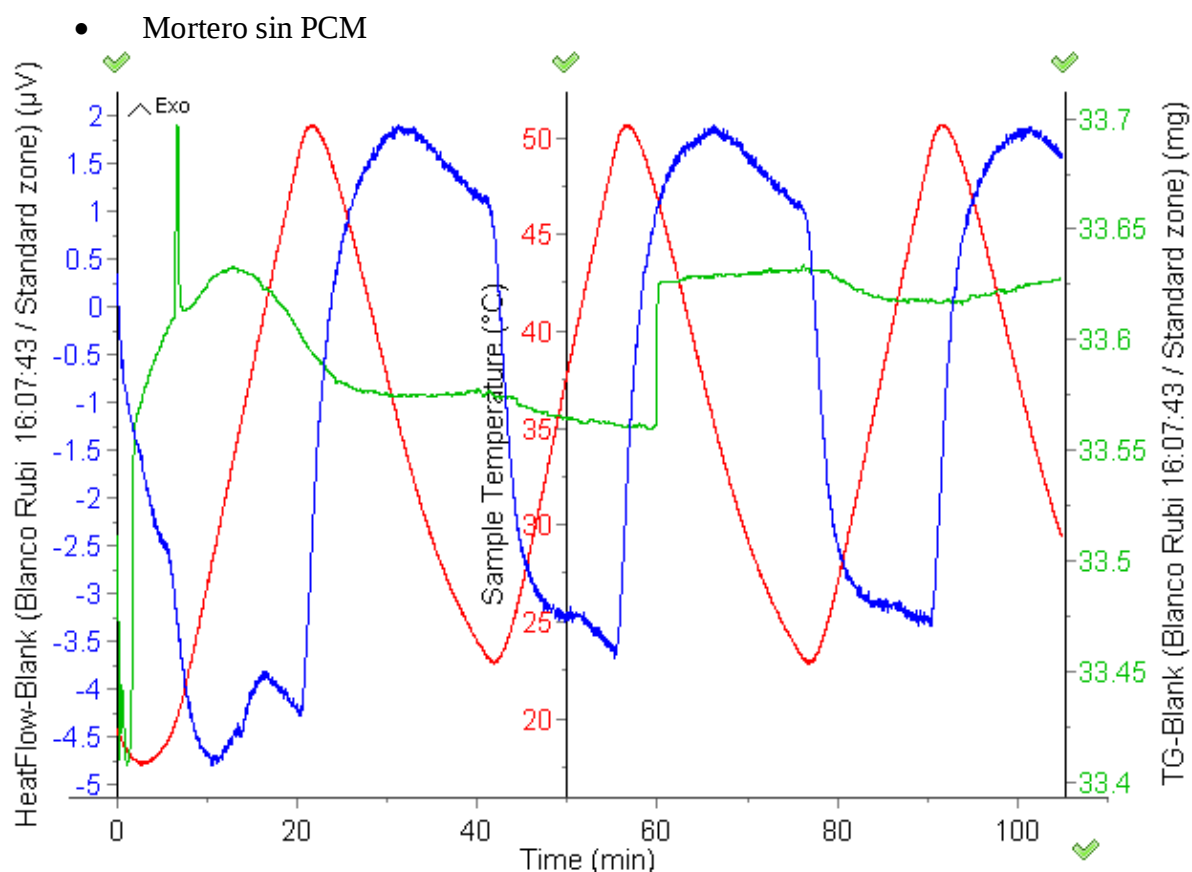
En cuanto a la línea azul, cuando se sitúe en valores positivos indicará que se trata de un proceso exotérmico, donde la muestra libera energía térmica. Cuando se sitúe en valores negativos significará que se trata de un proceso endotérmico, donde la muestra almacena energía. Todo lo anterior será imprescindible para extraer de las gráficas el efecto que ha tenido la adición de PCM en la capacidad calorífica de los morteros.

A continuación, se reflejan las gráficas tanto del crisol (blanco) como de los diferentes morteros:

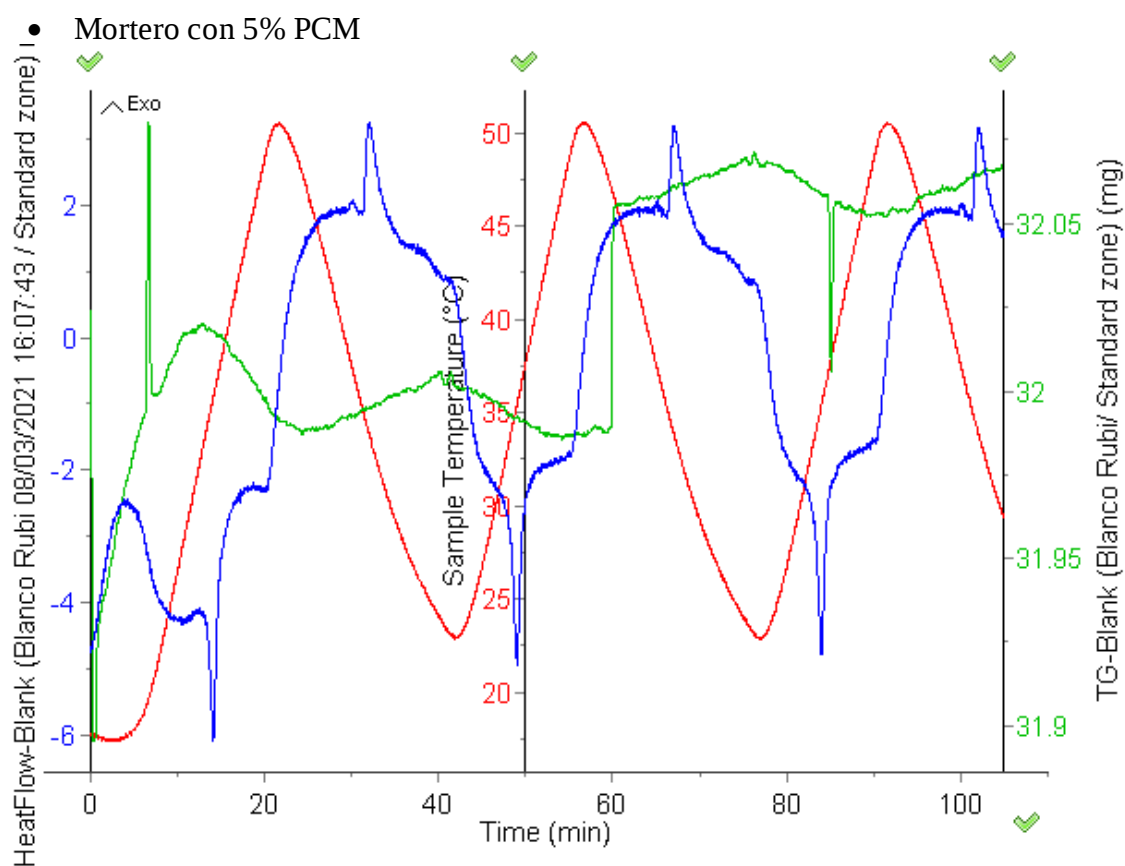
- Blanco (ensayo con crisol vacío)



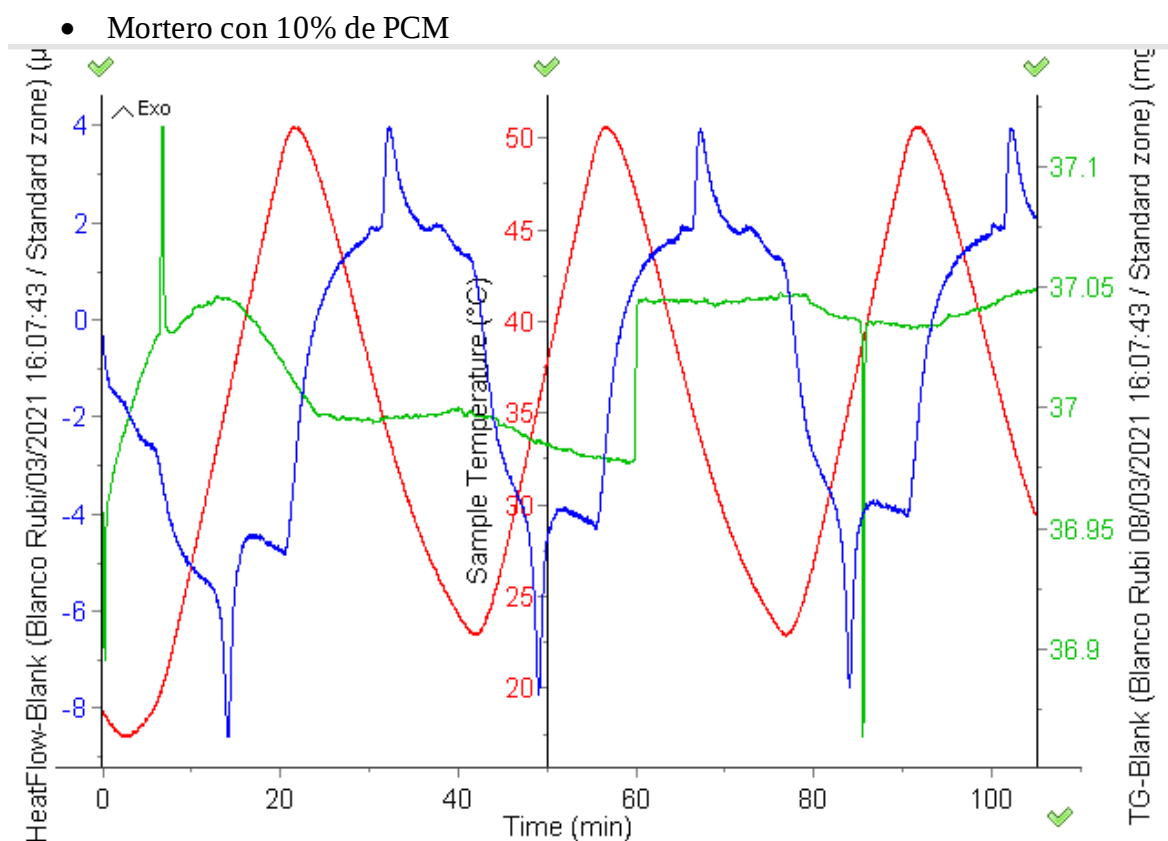
Gráfica 4-5 Blanco de los análisis del TG



Gráfica 4-6 Análisis TG-DSC mortero sin PCM



Gráfica 4-7 Análisis TG-DSC mortero con 5% PCM



Gráfica 4-8 Análisis TG-DSC mortero con 10% PCM

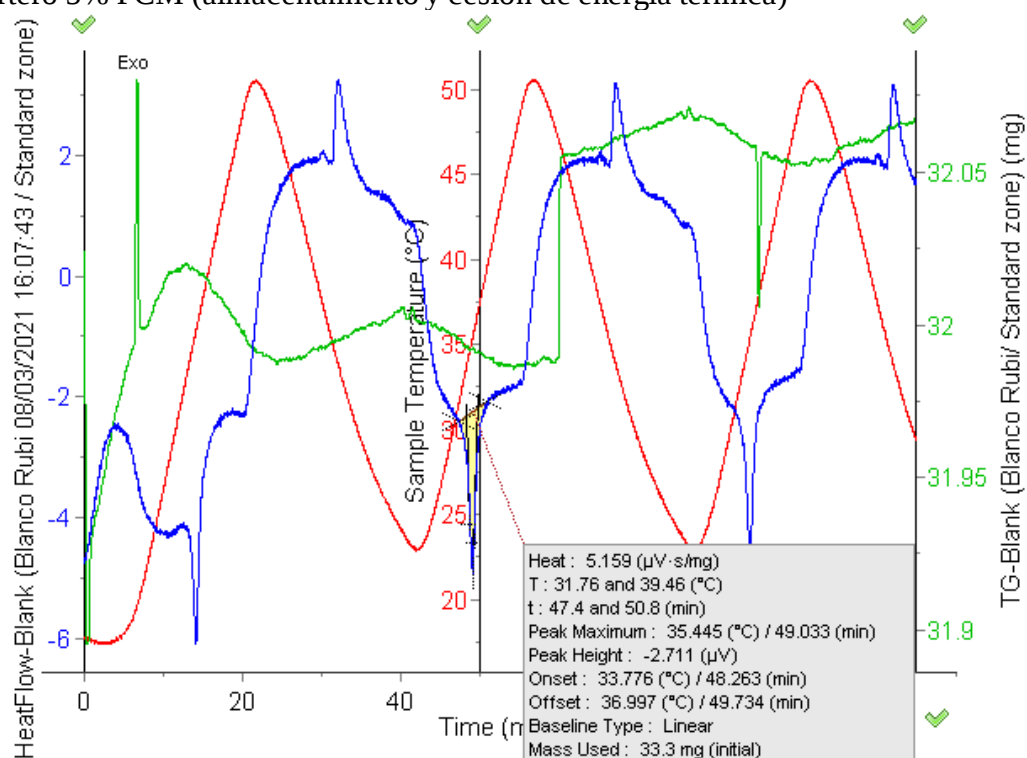
En la Gráfica 4-5, Gráfica 4-6, Gráfica 4-7 y la Gráfica 4-8 se observan los análisis TG-DSC del blanco, la muestra sin PCM y las muestras aditivadas con un 5% y un 10% de PCM, respectivamente. Cabe destacar que, aunque el ensayo esté compuesto por tres ciclos de calentamiento y enfriamiento, el primero se descarta por ser un ciclo de estabilización, centrando el interés en los otros dos.

La gráfica del ensayo del blanco sirve para restar el efecto del crisol vacío a los restantes ensayos, obteniendo así el comportamiento de la muestra que hay en el crisol en el resto de los ensayos.

El ensayo de la muestra sin PCM sirve para comparar con las muestras de los morteros con PCM y ver su efecto en el comportamiento térmico del material. Por lo tanto, el interés se centra ahora en las gráficas de los morteros con un contenido en PCM del 5% y del 10%.

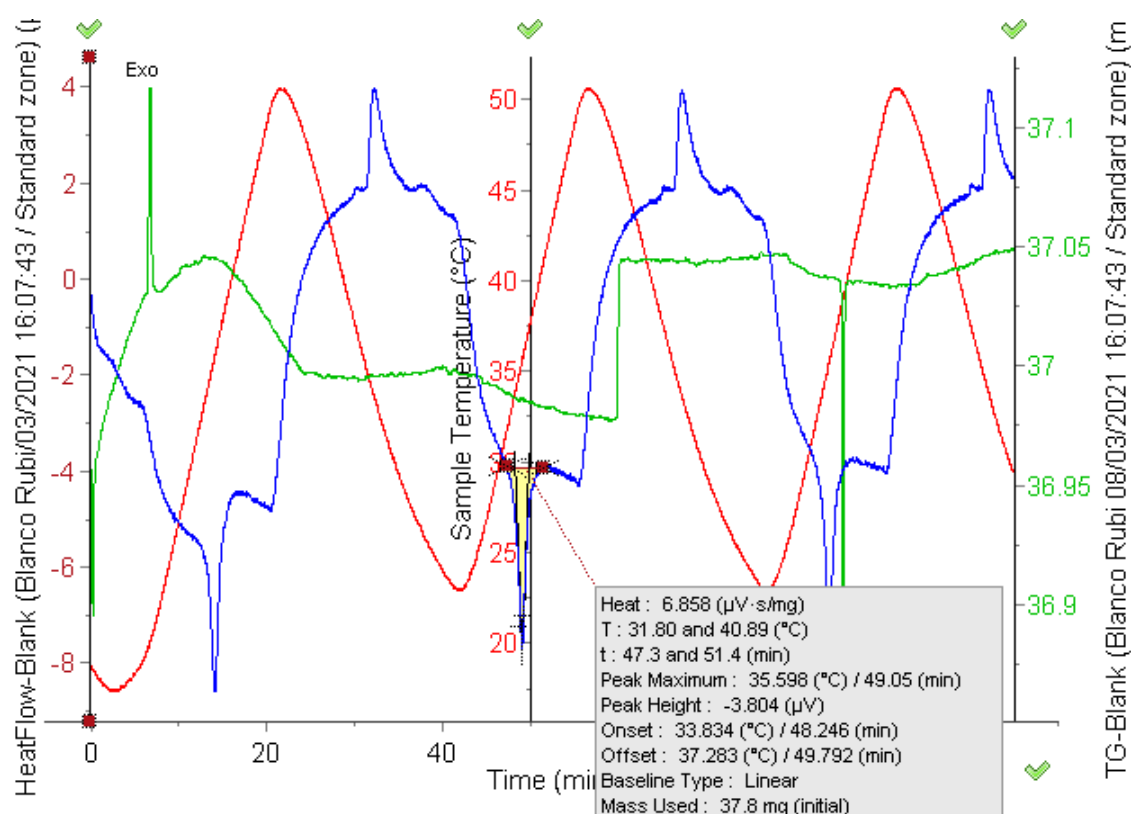
Se puede observar en la Gráfica 4-7 y la Gráfica 4-8 de ambas muestras como aparecen picos más pronunciados en los puntos próximos a la temperatura de fusión del PCM empleado (Rubitherm con temperatura de fusión en torno a 35° C). El área de estos picos representa la energía absorbida o cedida en el cambio de estado. Por lo tanto, el PCM funciona almacenando energía al fundirse, y liberándola una vez las temperaturas bajan de nuevo y se produce la solidificación.

- Mortero 5% PCM (almacenamiento y cesión de energía térmica)



Gráfica 4-9 Comportamiento térmico mortero 10% PCM

- Mortero 10% PCM (Almacenamiento y cesión de energía térmica)



Gráfica 4-10 Comportamiento térmico mortero 10% PCM

En la Gráfica 4-9 y la Gráfica 4-10 se vuelve a mostrar el comportamiento mostrado por los morteros con 5% y 10% de PCM, centrados en sus picos de liberación de energía. Por hacer una comparación, se elige el mismo pico en ambas gráficas y se mide el área dentro del mismo, en un rango de temperaturas de entre 31°C y 40°C aproximadamente. Se extrae de dicha medición que, como era de esperar, a mayor proporción de PCM mayor capacidad para almacenar y liberar energía.

Otra característica térmica que se puede observar en las muestras es la reversibilidad. En las gráficas de flujo de calor frente a la temperatura de la muestra, las curvas de flujo de calor en los ciclos representados (excepto el primero) son muy similares.

4.4 Análisis termográfico

El análisis termográfico se realiza con el objetivo de estudiar cómo afecta la adición de PCM a la conductividad térmica del mortero de cal. En la Figura 4-7 se observa como quedaron colocadas las muestras cilíndricas, lo cual servirá de referencia para interpretar las imágenes termográficas de acuerdo con la composición de cada probeta.

Las muestras se sacaron del horno a aproximadamente 74°C, colocándose sobre un lecho de agua a 17°C. Al transcurrir 47 minutos, las temperaturas se estabilizaron en torno a la temperatura ambiente y se tomó otra fotografía. Además, se fueron midiendo las temperaturas a lo largo del ensayo para generar una gráfica que muestre la evolución de las temperaturas de los diferentes morteros, que se comentará más adelante.



Figura 4-7 Disposición de las muestras (ensayo de conductividad)

Entre los informes que se generaron con *Flir Tools+* y *Flir Report Studio* se observa en la Figura 4-8 la imagen termográfica al inicio del ensayo y en la Tabla 4-11 los valores de temperatura de los marcadores situados en las probetas.

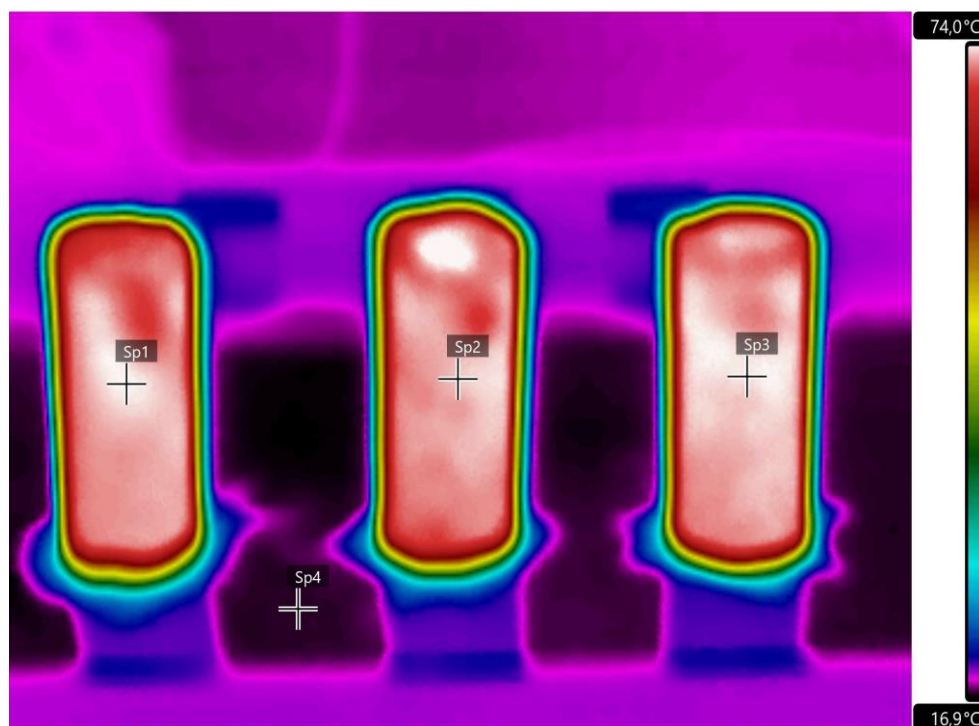


Figura 4-8 Imagen FLIR inicio del ensayo

Marcador	Temperatura (°C)
Sp1 (PCM0)	73,9 °C
Sp2 (PCM5)	73,3 °C
Sp3 (PCM10)	73,7°C
Sp4 (Agua)	17,5 °C

Tabla 4-11 Temperaturas iniciales del ensayo

En la Figura 4-9 se muestra la imagen termográfica de las probetas al final del ensayo, una vez se ha estabilizado la temperatura. En la Tabla 4-12 se resumen las temperaturas correspondientes a los marcadores de la imagen.

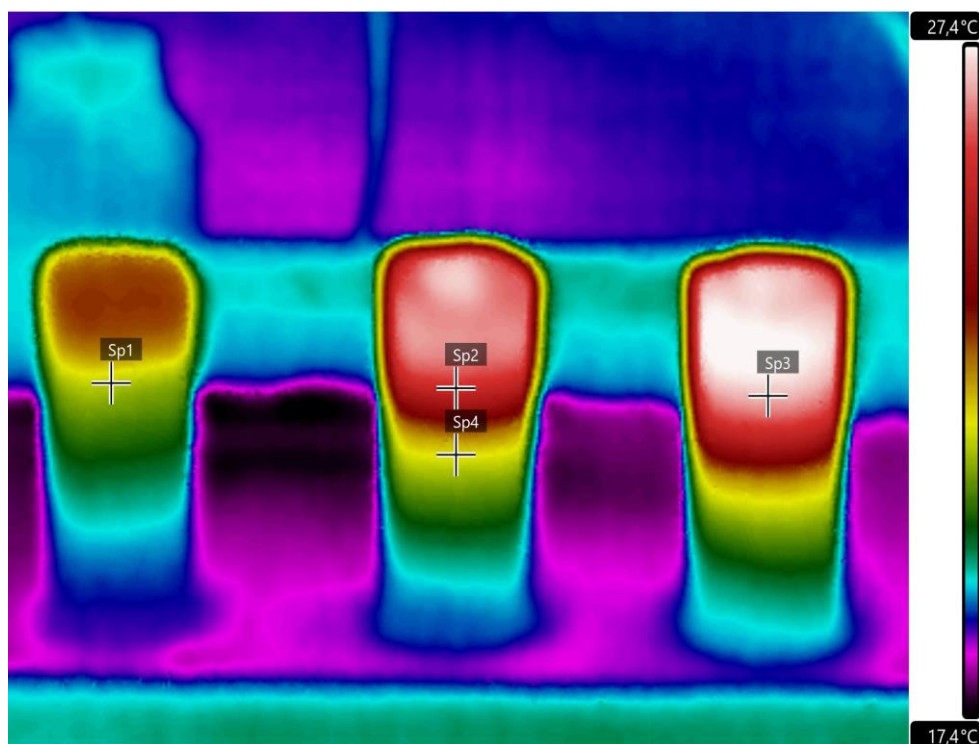


Figura 4-9 Imagen FLIR final del ensayo

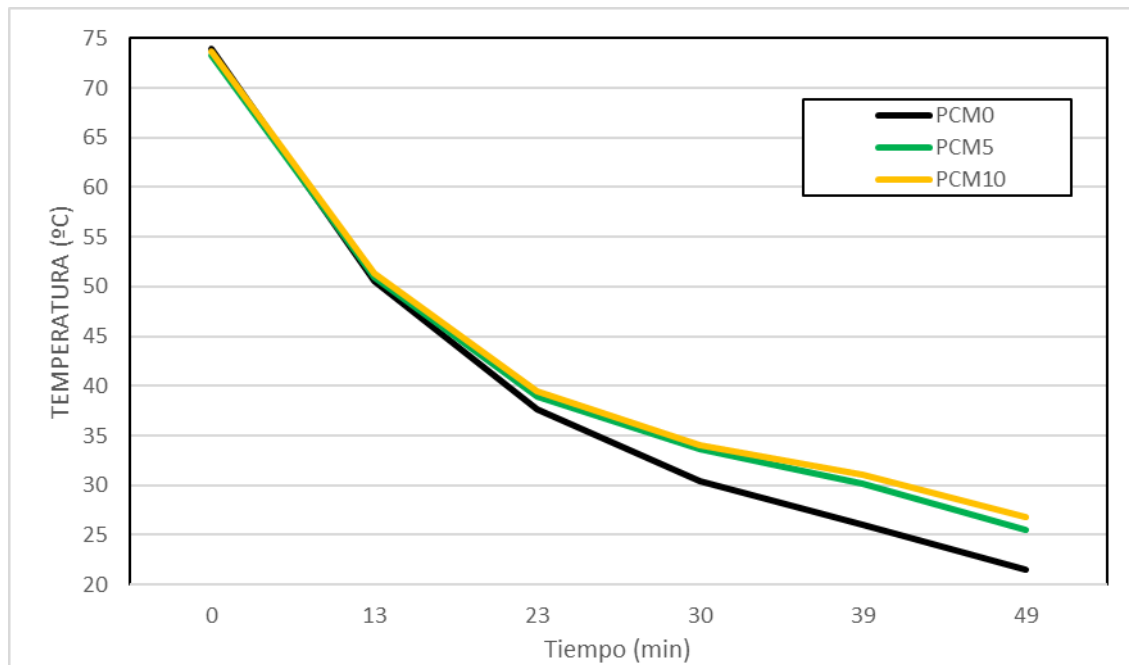
Marcador	Temperatura (°C)
Sp1 (PCM0)	21,5°C
Sp2 (PCM5)	25,5°C
Sp3 (PCM10)	26,8°C

Tabla 4-12 Temperaturas finales del ensayo

Como se puede observar en la evolución de la temperatura de las muestras, se cumple con el aporte esperado por parte del material de cambio de fase. Las muestras parten de una misma temperatura y al cabo de 47 minutos los datos de la imagen termográfica indican que hay una diferencia de más de 5°C entre el mortero con 10% de PCM y el mortero sin aditivos. Además, también se comprueba que a mayor proporción de PCM menor es la conductividad, reteniendo energía térmica durante periodos de tiempo más largos, lo cual es fundamental para la aplicación que se quiere dar a los morteros en cuestión.

Poniendo la mirada en la segunda imagen, el marcador SP4 indica que la temperatura de la probeta (mitad baja de la misma) es inferior al punto de solidificación del PCM, por lo que al haber pasado por ese cambio de fase se infiere que va liberando la energía térmica previamente almacenada, manteniendo caliente el resto de la pieza y ejerciendo como barrera térmica.

En la Gráfica 4-11 también se puede observar mediante un gráfico de líneas la evolución de las temperaturas de los diferentes tipos de mortero, siendo parecidas las curvas entre el de 10% y 5% (siendo ligeramente mayor para el primero) y mostrando las mismas una notable diferencia con el mortero de referencia (sin PCM). El tiempo está representado teniendo H como el inicio del ensayo, al que se le van sumando tiempos en minutos.



Gráfica 4-11 Temperatura de los morteros frente al tiempo

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

De los ensayos experimentales realizados en el presente trabajo se han obtenido las siguientes conclusiones:

- EL PCM incorporado mejora la capacidad de almacenamiento térmico del mortero de cal, frenando además el flujo de calor a través del mortero.
 - Las muestras aditivadas con PCM, muestran a su vez un efecto de barrera térmica, reducen la conductividad del mortero porque por una parte absorben energía al cambiar de estado y por otro lado crean “poros” de PCM en el medio del mortero reduciendo la transmisión de calor.
- En cuanto al efecto de la adición de PCM sobre la durabilidad frente a agentes ambientales externos (como las sales solubles) y condiciones meteorológicas extremas (hielo/deshielo y choque térmico) se extraen dos conclusiones:
 - Por un lado, la adición de mayor cantidad de PCM en situaciones de choque térmico consigue, al haber un elevado número de procesos de fusión/solidificación, que las presiones internas en los poros sean mayores y los morteros se fracturen antes.
 - Por otro lado, la excesiva adición de PCM reduce las “familias de poros” de los morteros al dejar contar con poros pequeños (1 μm). Como se comenta en el presente trabajo, el efecto de las fuerzas mecánicas en poros pequeños es más perjudicial para el material. Por lo tanto, en este caso el PCM aporta durabilidad frente a las sales solubles, siendo el efecto de su cristalización en poros de mayor tamaño menos dañino.

5.2 Líneas futuras

A la vista de los resultados obtenidos surgen nuevas líneas de investigación. En primer lugar, una de ellas sería el experimentar con elementos constructivos aditivados con mezclas de distintos PCM. Estas mezclas se prepararían con PCM con puntos de fusión diferentes para que se pudiera obtener un buen rendimiento térmico del material durante todo el año y no verse su utilidad limitada a ciertas estaciones. Para conseguir dicho objetivo se debería estudiar la proporción idónea de PCM a añadir y a que, de acuerdo con las conclusiones del presente trabajo, una mayor cantidad de PCM reduce la durabilidad del material frente al choque térmico.

En segundo lugar y relacionado con la línea de investigación anterior, la posible aplicación de dichos materiales a construcciones antiguas como los edificios de bases y arsenales de la Armada, con el fin de mejorar la eficiencia energética de los mismos, resulta de gran interés. A su vez sería de gran utilidad estudiar la viabilidad de aplicar elementos constructivos con PCM a los polvorines presentes

en dichas bases y arsenales. Éstos últimos necesitan de un especial control de la temperatura debido a el material que contienen (explosivos, munición, misiles, etc.). También, en los buques de la Armada existen ciertas cajas de emergencia cercanas a montajes de pequeño calibre que contienen munición y señuelos, las cuales están constantemente expuestas a las inclemencias meteorológicas y a la sal marina. El estudio de un recubrimiento con PCM para dichas cajas sería una posible línea de investigación.

Por último y como línea común a la estudiada en el presente trabajo y a las propuestas anteriormente, sería interesante experimentar el comportamiento de morteros aditivados con mezclas de PCM mediante la construcción de pequeños módulos como se hace en la tesis doctoral de Gerard Ferrer Muñoz [15].

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. J. Gil Fernández, «Caracterización termofísica y mecánica de un recubrimiento epoxi con efecto de barrea térmica,» Pontevedra, 2018.
- [2] B. Annie, «Annie B's Spanish kitchen,» [En línea]. Available: <https://www.anniebspain.com/vejer-de-la-frontera/>. [Último acceso: 4 Marzo 2021].
- [3] «BAER Heating and Cooling Inc.,» 3 Junio 2019. [En línea]. Available: <https://baerheatingcoolinginc.com/2019/06/03/lebanon-il-air-conditioning-should-interior-doors-stay-open-or-closed/>. [Último acceso: 4 Marzo 2021].
- [4] F. Birol y I. Andersen, «2019 Global Status Report for Buildings and Construction,» ONU, 2020.
- [5] «Objetivos de desarrollo sostenible,» ONU, [En línea]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>. [Último acceso: 4 Marzo 2021].
- [6] AEDENAT, «Ante el cambio climático, menos CO2,» Madrid, 1998.
- [7] J. Kosny, N. Shukla, A. Fallahi y E. Kossecka, «Experimental and Numerical Energy Performance Analysis of PCM-Enhanced Building Envelope Products and Systems,» Viena, 2013.
- [8] M. Rostamizadeha, M. Khanarkhani y S. Sadrameli, «Simulation of energy storage systems with phase change materials (PCM),» 2012.
- [9] M. T. Blanco-Varela, S. Martínez-Ramírez y C. Fortes Revilla, «Propiedades y durabilidad de los morteros de cal y metacaolín,» Instituto de Ciencias de la Construcción (CSIC), 2015.
- [10] I. Sarbu y Sebarchievici, «Solar Heating and Cooling: Fundamentals, Experiments and Applications,» Elsevier, Oxford, UK, 2016.
- [11] I. Dincer y M. Rosen, «Thermal Energy Storage: Systems and Applications,» John Wiley & Sons, Chichester, UK, 2011.
- [12] P. Arce, M. Medrano, A. Gila, E. Oró y L. F. Cabeza, «Overview of thermal energy storage (TES) potential energy savings and climate change mitigation in Spain and Europe,»

2011.

- [13] A. Hauer, «Innovate Thermal Energy Storage Systems for Residential Use,» Bavarian Center for Applied Energy Research, ZAE Bayern, 2002.
- [14] I. Sarbu y C. Sebarchievici, «Comprehensive review of thermal energy storage,» Timisoara, 2018.
- [15] G. F. Muñoz, «Characterization, equation formulation and enhancement of phase change materials(PCM) for thermal energy storage(TES),» Lleida, 2016.
- [16] K. Pielichowska y K. Pielichowski, «Phase change materials for thermal energy storage (Prgress in Materials Science),» Cracovia, 2014.
- [17] I. Sevilla Ávila, J. L. Serrano Cantó, J. F. Rodríguez y F. J. Castilla Pascual, «Estudio metodológico sobre aprovechamiento de materiales de cambio de fase para la elaboración de morteros de revestimiento de arcilla en paramentos interiores de edificación,» XII CIATTI - Congreso Internacional de Arquitectura de Tierra, Valladolid, 2015.
- [18] D. Arias Arranz, «Yeso aditivado con materiales de cambio de fase para su aplicación en rehabilitaciones energéticas en interiores de edificios protegidos,» Congreso Nacional del Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Madrid, 2014.
- [19] S. Himran y A. Suwono, «Characterization of Alkanes and Paraffin Waxes for Application as Phase Change Energy Storage Medium,» Energy Sources Journal, Chicago, Illinois, 1994.
- [20] D. Ramírez, Integración de materiales de cambio de fase en placas de yeso reforzado con fibras de polipropileno, Madrid, 2009.
- [21] J. A. Soto Socolí, Estudio sobre la incorporación de materiales de cambio de fase en elementos constructivos, 2017.
- [22] D. Ames, The Past, Present and Future of Eutectic Salt Storage Systems, ASHRAE Journal, 1989.
- [23] M. Telkes, Thermal storage for solar heating and cooling. Proceedings of the workshop on solar energy storage subsystems for the heating and cooling of buildings., Charlottesville, VA, USA, 1975.
- [24] G. Lane, Solar heat storage: latent heat material Vol.II, Technology, Florida: CRC Press, 1986.
- [25] H. Barkmann y F. Wessling, Use of buildings structural components for thermal storage. Proceedings of the Workshop on Solar Energy Storage Subsystems for the heating and cooling of buildings., Charlottesville, VA, EEUU, 1975.
- [26] A. Lasheras Estrella, Viabilidad de los Materiales de Cambio de Fase en Edificación, Cartagena, 2013.
- [27] G. Ferrer, A. Solé, C. Barrenche, I. Martorell y L. F. Cabeza, Review on the methodology used in thermal stability characterization of phase change materials, Lleida: Department of Materials Science and Metallurgical Engineering, Universitat de Barcelona.
- [28] E. Oró et al, Review on phase change materials for cold thermal energy storage applications, Applied Energy, 2012.

- [29] M. Farid et al, A review on phase change energy storage: materials and applications (p.1597-1615), Conversion and Management, 2004.
- [30] A. Solé, H. Neumann, S. Niedermaier, I. Martorell, P. Schossig y L. F. Cabeza, Stability of sugar alcohols as PCM for thermal energy storage. Solar energy materials and solar cells, 2014.
- [31] A. Abhat, Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials. Solar energy, 1983.
- [32] S. Sharma y K. Sagara, Latent heat storage materials and systems: A review, Osaka, Japón: Taylor and Francis Inc, 2005.
- [33] J. A. Tenorio Ríos, Ahorro energético en edificios mediante el almacenamiento estructural con materiales de cambio de fase, Sevilla, 2014.
- [34] Y. Zhang et al, «Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State of the art and outlook,» Elsevier, Pekín, 2006.
- [35] A. Thiele, «Microencapsulated Phase Change Composite Materials for Energy Efficient Buildngs,» Los Ángeles, California, 2016.
- [36] R. Ansuini et al, «Radiant floors integrated with PCM for indoor temperature control,» Elsevier, Ancona (Italia), 2011.
- [37] F. Kuznik, «Energetic efficiency of room wall containing PCM wallboard: A full-scale experimental investigation,» Elsevier, 2007.
- [38] J. Kosny et al, «Field thermal performance of naturally ventilated solar roof with PCM heat sink,» Elsevier, 2012.
- [39] R. M. Usedo Valles, «Estudio y análisis de la utilización de la cal para el patrimonio arquitectónico,» Valencia, 2015.
- [40] «Antana Arquitectura y Construcción,» 20 Enero 2021. [En línea]. Available: <https://www.antana.es/una-de-cal-y-otra-de-arena-del-revoco-a-los-estucos/>. [Último acceso: 22 Febrero 2021].
- [41] S. Cunha, J. Aguiar y A. Tadeu, «Thermal performance and cost analysis of mortars made with PCM and different binders,» Elsevier, Guimarães/Coimbra (Portugal), 2016.
- [42] M. Theodoridou, L. Kyriakou y I. Ioannou, «PCM-enhanced Lime Plasters for Vernacular and Contemporary Architecture.,» 2016.
- [43] S. Lucas y J. Barroso de Aguiar, «Multifunctional wall coating combining photocatalysis, self-cleaning and latent heat storage,» Materials Research Express, 2018.
- [44] S. Lucas y J. Barroso de Aguiar, «Evaluation of latent heat storage in mortars containing microencapsulated paraffin waxes- a selection of optimal composition and binders,» 2019.
- [45] S. Martínez-Ramírez, F. Puertas y M. T. Blanco Varela, «Morteros de reparación basados en cal. Ensayos de envejecimiento acelerado,» IETCC/CSIC, España, 1995.
- [46] D. Hawes, D. Feldman y D. Banu, «Latent heat storage in building materials. Energy and buildings,» Montreal, Quebec, 1993.

- [47] D. Feldman y D. Hawes et al, «Obtaining an energy storing building material by direct incorporation of an organic phase change material in gypsum wallboard,» 1991.
- [48] D. Hawes y D. Feldman, «Absorption of phase change materials in concrete,» 1992.
- [49] P. Schossig, H. Henning, S. Gschwander y T. Haussmann, «Microencapsulated phase-change materials integrated into construction materials,» 2005.
- [50] M. Zhang, A. Mario y B. Jennifer, «Development of a thermally enhanced frame wall with phase change materials for on-peak air conditioning demand reduction and energy savings in residential buildings.,» International Journal of Energy Research, 2005.
- [51] I. Navarrete Pardo, «Desarrollo de compuestos con resinas epoxi y materiales de cambio de fase,» Pontevedra, 2019.
- [52] Hawlader, Uddin y Khin, «Micro-encapsulated PCM thermal energy storage system,» 2003.
- [53] D. Juárez, R. Balart, S. Ferrándiz y D. García, «Estudio de materiales con cambio de fase (PCM) y análisis SEM de micro (PCM),» Área de Innovación y Desarrollo S.L., Valencia, 2012.
- [54] G. Zsembinski, Á. G. Fernández y L. F. Cabeza, «Selection of the appropriate phase change materials for two innovative compact energy storage systems in residential buildings,» Applied Sciences, Lérida, 2020.
- [55] Rubitherm, «Rubitherm Phase Change Material,» [En línea]. Available: <https://www.rubitherm.eu/en/index.php/productcategory/organische-pcm-rt>. [Último acceso: 8 Marzo 2021].
- [56] I. De Rosario Amado y J. Feijoo Conde, Alteración de las rocas y otros materiales de construcción en los monumentos. Técnicas de conservación, Pontevedra: Universidad de Vigo, 2016.
- [57] J. Feijoo Conde, «Definición de los protocolos más eficaces para la desalación en granitos ornamentales,» Vigo, 2016.
- [58] H. Aoki y Y. Matsukura, «Estimating the unconfined compressive strength of intact rocks from Equotip hardness,» 2008.
- [59] R. Fort, B. Fernández-Revuelta, M. Varas, M. Álvarez de Buergo y M. Taborda-Duarte, «Influence of anisotropy on the durability of Madrid region cretaceous dolostone exposed to salt crystallization processes,» 2008.
- [60] J. Feijoo, R. Fort, L. Gomez-Villalba, M. Rabanal y L. Ottosen, «Electroprecipitation of Magnesium and Calcium Compounds for Weathering Protection of Ornamental Rocks,» American Chemical Society, 2020.
- [61] S. Ordóñez y M. García del Cura, «Pore size distribution and the durability of a porous limestone,» Quarterly Journal of Engineering Geology, 1997.
- [62] D. Benavente García, «Modelización y estimación de la durabilidad de materiales pétreos porosos frente a la cristalización de sales,» Alicante, 2002.
- [63] R. Rossi-Manaresi y A. Tucci, «Pore structure and the disruptive effect of salt crystallization in various types of stone,» 1991.

- [64] A. Arnold y K. Zehnder, «Salt weathering on monuments,» Zürich, 1987.
- [65] SETARAM Instrumentation, «Presentation of thermal analysis techniques».
- [66] FLIR, «Guía sobre termografía para aplicaciones en edificios y energías renovables,» 2011.
- [67] PREDITEC, «Flir i7».
- [68] ASTM, «Standard Test Method for Determination of Rock Hardness by Rebound Hammer Method,» Pennsylvania, 2000.
- [69] Schlumberger, «Oilfield Glossary,» 2021. [En línea]. Available: https://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/u/uniaxial_compressive_strength.aspx. [Último acceso: 6 Marzo 2021].
- [70] C. Hertfelder Chisvert, «Estudio de la modificación de las propiedades al incorporar materiales de cambio de fase en morteros,» Pontevedra, 2021.
- [71] J. Feijoo, X. Nóvoa y T. Rivas, «Electrokinetic treatment to increase bearing capacity and durability of a granite,» Vigo, 2017.
- [72] G. Dagdelen, E. Sezer y C. Gokceoglu, «Some non-linear models to predict the weathering degrees of a granitic rock from physical and mechanical parameters,» 2011.
- [73] G. R.E., «Introduction to rock mechanics (2nd Edition),» New York, 1989.
- [74] J. Ordaz y R. Esbert, «Porosity and capillarity in some sandstone and dolomite monumental stone,» 1985.
- [75] Rodacal Beyem S.L., 6 Marzo 2015. [En línea]. Available: https://rodacal.com/wp-content/uploads/woocommerce_uploads/2020/08/htcalhidratadaed2-1-c9drmr.pdf. [Último acceso: 9 Marzo 2021].

ANEXO I: CAL HIDRATADA CL-90-S

Cal hidratada

Hidróxido de calcio CL-90-S en polvo para
construcción



EN 459-1

Usos

La CAL HIDRATADA presenta un amplio campo de utilización en diversas industrias (fabricación de papel, cuero, carburo de calcio, álcalis, azúcar, caucho sintético, metalurgia, fabricación de vidrio, etc...). El hidróxido de calcio es ampliamente utilizado como adición para morteros y pinturas, secado y estabilización de suelos, corrector de pH, desinfectante, neutralización de lodos, desulfuración de humos, tratamiento de agua potable, depuración y neutralización de aguas residuales, etc...

Para su utilización en morteros de albañilería las dosificaciones más frecuentes son:

Mortero de Cal: 1:2 ó 1:3 (cal/arena).

Morteros bastardos: 1:1:8 y 1:1:6. (cemento/cal/arena).

Como adición en la fabricación de pinturas, añadiendo agua al hidróxido de calcio obtenemos una pintura a la cal que da acabados mates, porosos y absorbentes de gran resistencia a las inclemencias del tiempo.

Datos Técnicos

Datos de identificación y aplicación del producto

Apariencia	Polvo fino
Color	Blanco
Densidad aparente	≈ 400 Kg/m ³
Peso molecular	74 g/mol
Intervalo granulométrico	0-200 μm
Ca(OH) ₂ Total	≈ 92%
MgO	≤ 5%
CO ₂	≤ 4%
Expansividad	< 1mm
Estabilidad (método de referencia)	≤ 2 mm
Contenido en aire	≤ 12%
Rendimiento	Segú uso
Partida arancelaria	25.22.20.00
Prestaciones Finales	
Clasificación	CL 90-S

Figura A1-0-1 Ficha técnica CL-90-S [75]

ANEXO II: DIMENSIONES DE LAS PROBETAS

TIPO PROBETA	DIMENSIÓN	MEDIDA EN CM
CILÍNDRICA	DIÁMETRO	5,7
	ALTURA	12,2
CUBO BISELADO	LADO BASE	4,71
	LADO BISEL	3,81
	ALTURA SIN BISEL	3,96
	ALTURA TOTAL	4,66
TRONCO DE CONO (VASO)	DIÁMETRO (D)	6,26
	DIÁMETRO (d)	4,32
	ALTURA	9,045

Figura A2-0-1 Dimensiones de las diferentes probetas

ANEXO III: LISTA DE PCM's COMERCIALES

PCM	Producto	Punto de transición (°C)	Calor latente (kJ/kg)	Empresa	Referencias
Latest TM 20T	Inorganic salt	19-20	175	TEAP	[26]
ES21	-	21	150	EPS	[27]
A22	-	22	172	EPS	[27]
RT 20	Paraffin	22	130	Rubitherm GmbH	[28]
SP 22 A4	Salt hydrate	22	165	Rubitherm GmbH	[28]
Climsel C22	Salt hydrate	22	216	Climator	[29]
A23	-	23	170	EPS	[27]
E23	-	23	155	EPS	[27]
Climsel C24	Salt hydrate	24	108	Climator	[29]
DC-24	Salt hydrate	24	158	Dörkern	[30]
A25	-	25	172	EPS	[27]
SP 25 A8	Salt hydrate	25	180	Rubitherm GmbH	[28]
Latest TM 25T	Inorganic salt	24-26	175	TEAP	[26]
E27	-	27	180	EPS	[27]
SLT 27	Salt hydrate	27	213	Mitsubishi chemical	[19], [31]
S27	Salt hydrate	27	207	Cristopia	[19], [32]
A28	-	28	245	EPS	[27]
PX 27	Paraffin	28	112	Rubitherm GmbH	[28]
RT 27	Paraffin	28	179	Rubitherm GmbH	[19], [28]
Climsel C28	Salt hydrate	28	126	Climator	[29]
TH 29	Salt hydrate	29	188	TEAP	[19], [26]
Latest TM 29T	Inorganic salt	28-30	175	TEAP	[26]
E30	-	30	201	EPS	[27]
RT 31	Paraffin	31	168	Rubitherm GmbH	[19], [28]
Climsel C32	Salt hydrate	32	194,4	Climator	[29]

Figura A3-0-1 Lista PCM comerciales [15]

ANEXO IV: FICHA TÉCNICA RUBITHERM RT35HC

Data sheet



RT35HC



RUBITHERM® RT is a pure PCM, this heat storage material utilising the processes of phase change between solid and liquid (melting and congealing) to store and release large quantities of thermal energy at nearly constant temperature. The RUBITHERM® phase change materials (PCM's) provide a very effective means for storing heat and cold, even when limited volumes and low differences in operating temperature are applicable.

Properties for RT-line:

- high thermal energy storage capacity
- heat storage and release take place at relatively constant temperatures
- no supercooling effect, chemically inert
- long life product, with stable performance through the phase change cycles
- melting temperature range between -9 °C and 100 °C available

The most important data:

Melting area	34-36	[°C]
	main peak: 35	
Congeeing area	36-34	[°C]
	main peak: 35	
Heat storage capacity ± 7,5%	240	[kJ/kg]*
Combination of latent and sensible heat in a temperature range of 27°C to 42°C.	67	[Wh/kg]*
Specific heat capacity	2	[kJ/kg·K]
Density solid at 25°C	0,88	[kg/l]
Density liquid at 40°C	0,77	[kg/l]
Heat conductivity (both phases)	0,2	[W/(m·K)]
Volume expansion	12	[%]
Flash point	177	[°C]
Max. operation temperature	70	[°C]

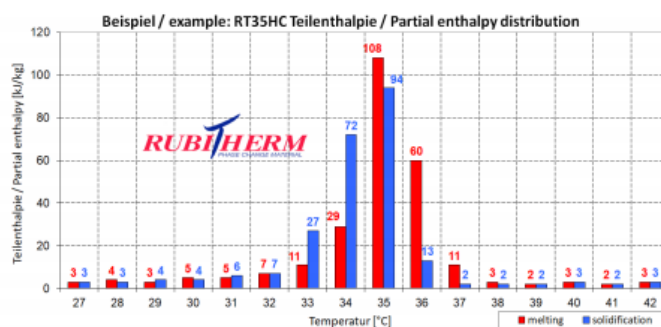


Figura A4-0-1 Ficha técnica Rubitherm RT35HC

ANEXO V: FICHA TÉCNICA FLIR i7

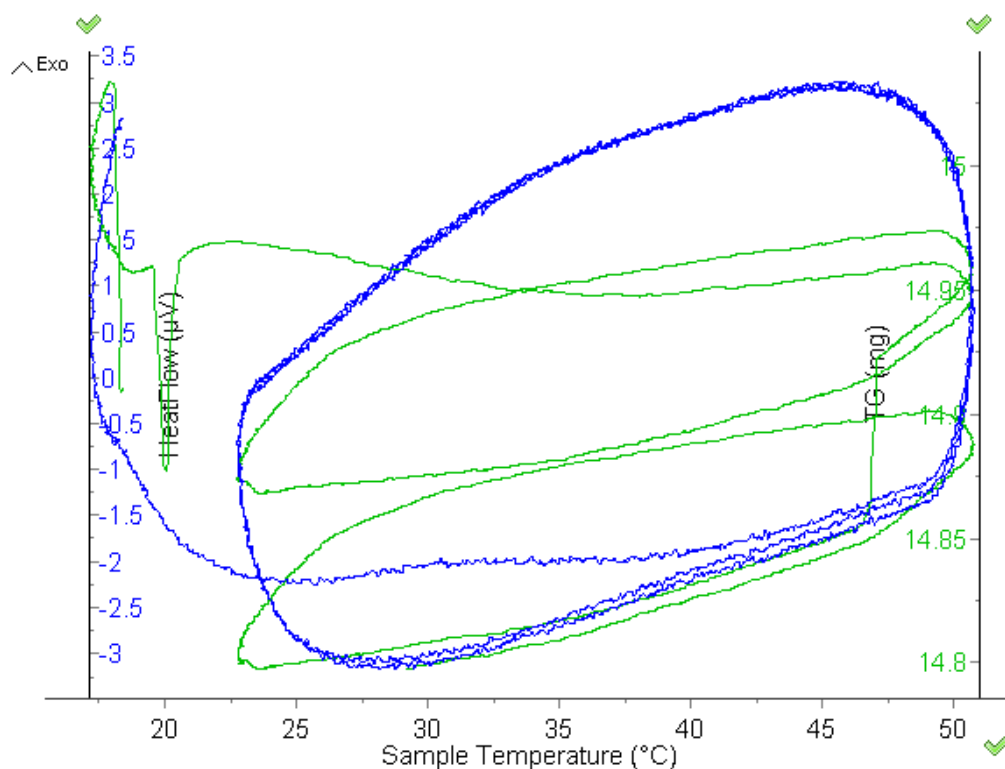
Especificaciones técnicas FLIR i7

Características	
Intervalo de temperatura	0°C a 250°C
Almacenamiento de imágenes	5000 imágenes (tarjeta de memoria microSD)
Emisividad	Cuadro de emisividad: 0,1 a 1,0 (ajustable)
Características de las imágenes/presentación de las imágenes	
Campo de visión/distancia focal mínima	25° X 25°/0,5 m
Enfoque	Sin necesidad de enfocar
Sensibilidad térmica (NETD)	<0,1°C a 25°C
Tipo de detector	120 X 120 píxeles Matriz de plano focal (FPA), microbolómetro sin refrigerar
Rango espectral	7,5 - 13 µm
Pantalla	LCD en color de 2,8"
Controles de la imagen	Paletas de colores (ocres, multicolor y blanco y negro)
Controles de configuración	Fecha/hora, °C/°F, 21 idiomas
Modos de medición	Puntos (con corrección por emisividad y temperatura reflejada), Áreas (máx./mín.), isotermas (intervalo de temperatura seleccionado superior/inferior)
Tipo de batería	Ión de litio
Tiempo de funcionamiento de la batería	5 horas, la pantalla muestra el estado de la batería
Sistema de recarga	En la cámara, adaptador de CA, 3 horas para el 90% de capacidad
Sistema CA	Adaptador de CA de 90-260 Vca, 50/60 Hz
Tensión del adaptador	Salida de 5 Vca
Intervalo de temperaturas para su uso	0°C a 50°C
Intervalo de temperaturas de almacenamiento	-40°C a 70°C
Humedad	20-80% de funcionamiento y almacenamiento, sin condensación, IEC 359
Descarga eléctrica	25G, IEC 68-2-29
Vibración	25G, IEC 68-2-6
Dimensiones/peso	223 x 79 x 83 mm/ <340 g (12 oz.), batería incluida

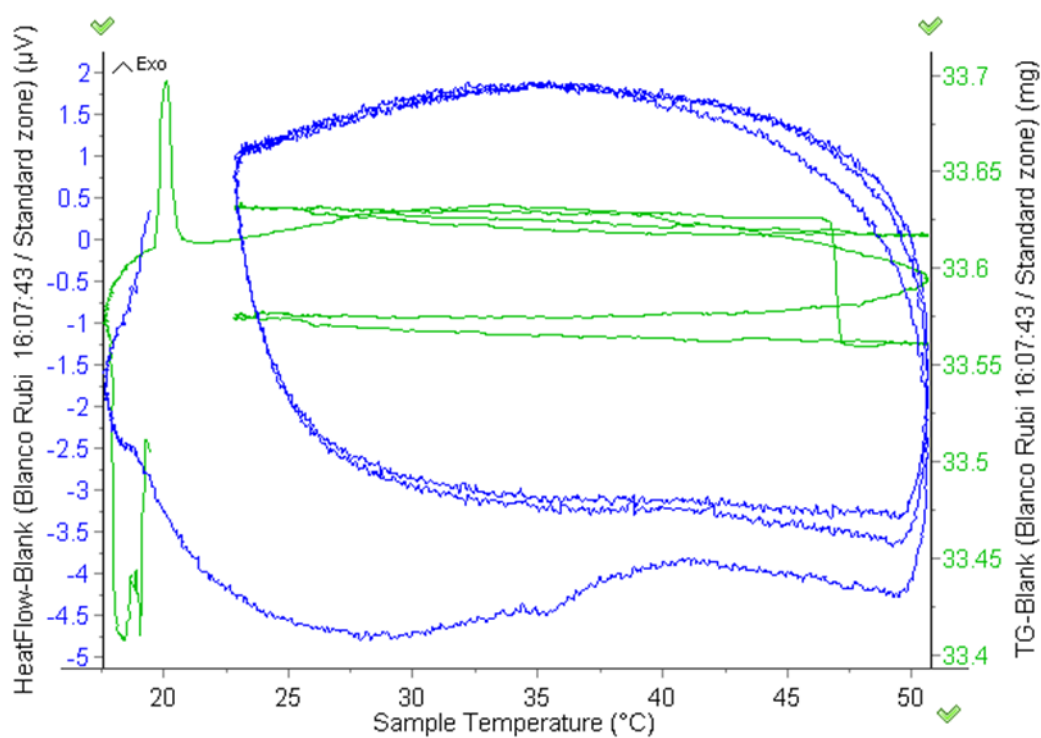
Figura A5-0-1 Ficha técnica FLIR i7

ANEXO VI: GRÁFICAS TG-DSC

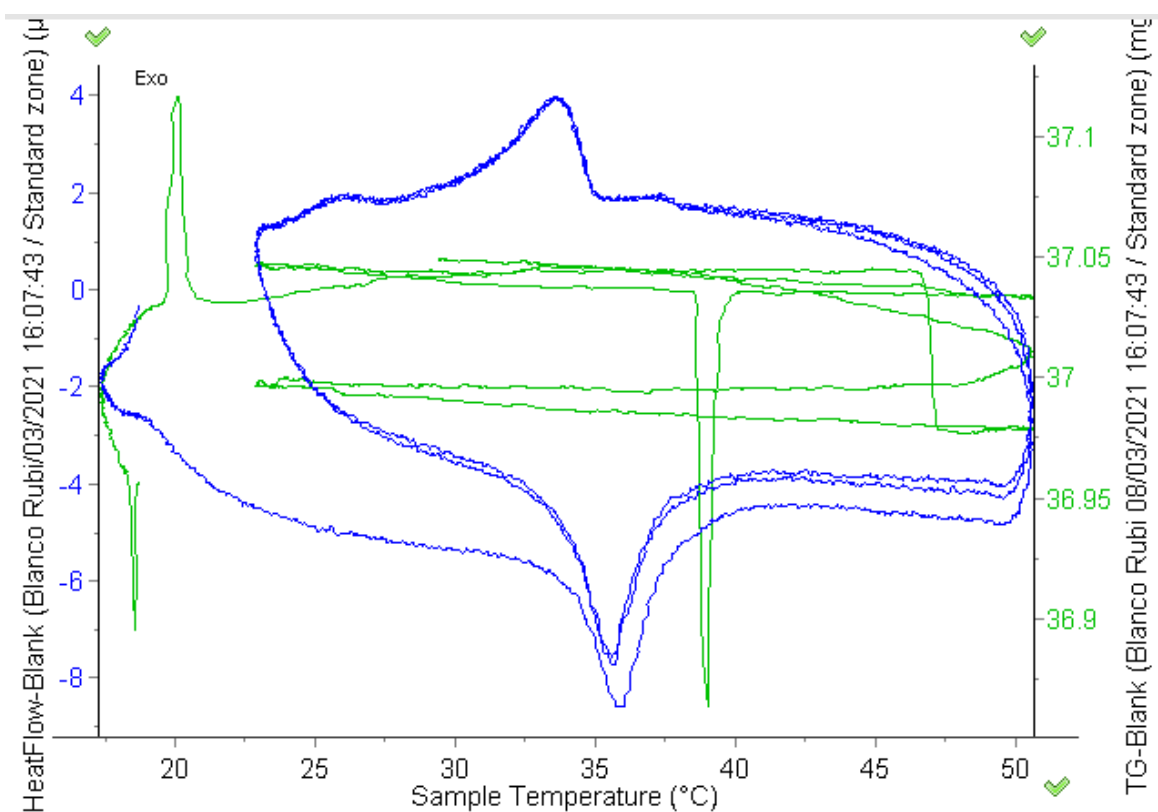
En el presente anexo se muestran las gráficas de flujo de calor frente a temperatura de la muestra de los diferentes tipos de mortero sometidos a ensayo.



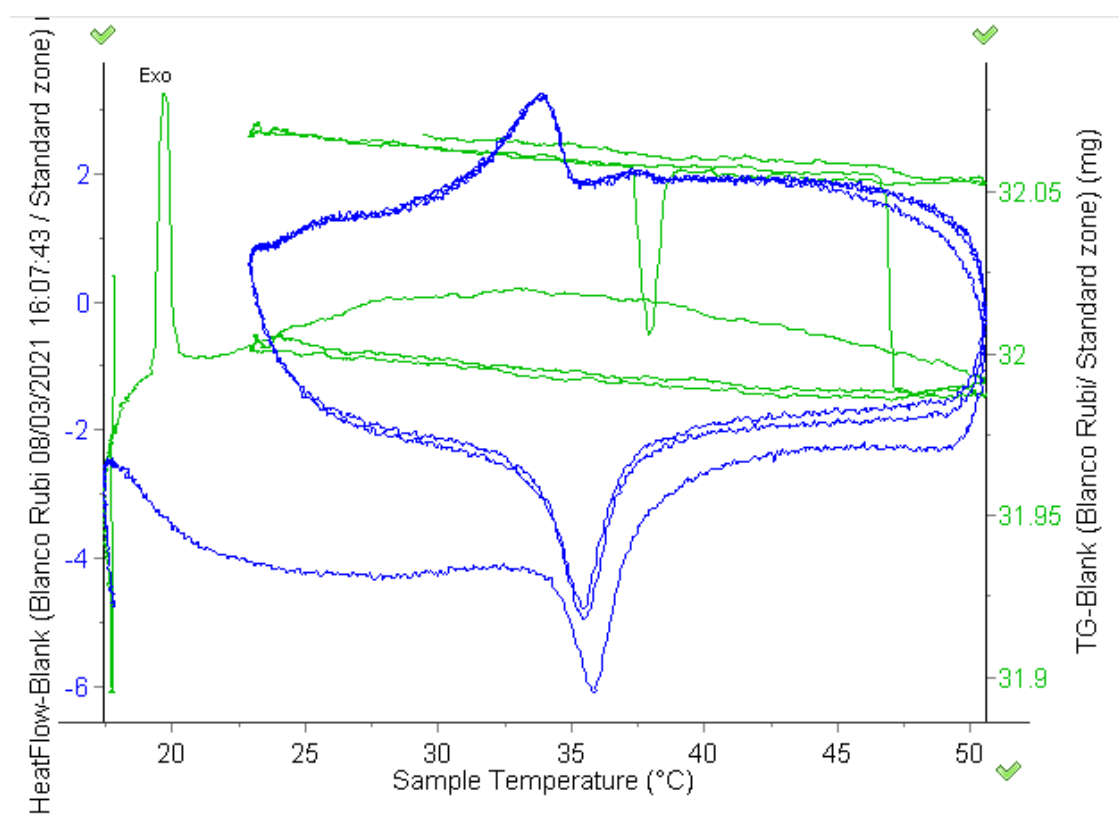
Gráfica A6-1 TG-DSC Blanco (Heatflow)



Gráfica A6-2 TG-DSC sin PCM (Heatflow)



Gráfica A6-3 TG-DSC 5% PCM (Heatflow)



Gráfica A6-4 TG-DSC 10% PCM (Heatflow)