



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Influencia de la incorporación de PCM en las características
mecánicas y térmicas de los morteros de cemento.*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Dimas Antúnez Rey

DIRECTORES: Miguel Ángel Álvarez Feijoo

CURSO ACADÉMICO: 2023-2024

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Influencia de la incorporación de PCM en las características
mecánicas y térmicas de los morteros de cemento.*

Grado en Ingeniería Mecánica

Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General / Infantería de Marina

UniversidadeVigo

RESUMEN

En un mundo donde la búsqueda de alternativas al consumo energético es cada vez más crucial, este trabajo se ha centrado en analizar muestras de hormigón con diferentes tipos de materiales de cambio de fase (PCM) RT35 y RT18. Este estudio se centra en investigar cómo la incorporación de PCM en el mortero puede mejorar la eficiencia energética en la construcción. A través de ensayos de capilaridad, ultrasonidos, análisis termográficos, hielo-deshielo, choque térmico, alteración por sales y análisis termogravimétrico y de calorimetría diferencial, se evaluaron las propiedades y el comportamiento de las muestras. El objetivo es comprender cómo los PCM pueden influir en la capacidad de regulación térmica del mortero, lo que puede tener implicaciones significativas en la eficiencia energética de los edificios. Este estudio contribuye al avance en la investigación de materiales de construcción sostenibles y a la búsqueda de soluciones innovadoras para mejorar la eficiencia energética en la construcción.

PALABRAS CLAVE

Mortero, Cemento, Material de cambio de fase (PCM), Construcción, Eficiencia energética.

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría expresar mi más sincero agradecimiento a todos aquellos que han contribuido de alguna manera a la realización de este Trabajo de Fin de Grado.

- A mis padres, quienes me han brindado una educación inmejorable desde pequeño y me han inculcado valores que han guiado mi camino. Su apoyo incondicional y su constante ánimo han sido mi mayor inspiración.
- A mi tutor, por su guía experta, su apoyo constante y su dedicación incansable en cada etapa de este proyecto. Su orientación ha sido invaluable para alcanzar mis metas académicas.
- A mi pareja, por ser mi fuente de apoyo emocional, por animarme a superar los desafíos y por estar a mi lado en cada paso del camino.

Muchas gracias en general a todos aquellos que han contribuido durante estos cinco años a mi formación humana y académica.

CONTENIDO

1	Introducción y objetivos.....	1
1.1	Introducción a la situación actual.....	1
1.2	Motivación	3
1.3	Objetivos	3
2	Estado del arte	5
2.1	Almacenamiento de la energía térmica	5
2.1.1	Generalidades	5
2.1.2	Almacenamiento en forma de calor sensible (SHS)	8
2.1.3	Almacenamiento en forma de calor latente (LHS)	9
2.1.4	Almacenamiento mediante reacciones termoquímicas (TQS)	10
2.2	Morteros	11
2.2.1	Generalidades	11
2.2.2	Componentes de los morteros.....	11
2.3	Materiales de cambio de fase (PCM).....	15
2.3.1	Generalidades.....	15
2.3.2	Clasificación PCM	16
2.3.3	PCM en la edificación.....	19
3	Desarrollo del TFG	23
3.1	Materiales.....	23
3.1.1	Morteros de cemento.....	23
3.1.2	PCM	24
3.2	Metodología experimental	25
3.2.1	Análisis de dureza superficial	25
3.2.2	Caracterización de los morteros de cemento.....	26
3.2.3	Análisis termográfico	30
3.2.4	Ensayos de durabilidad	31
3.2.5	Análisis termogravimétrico y calorimetría de barrido diferencial	34
4	Resultados	39
4.1	Dureza superficial al impacto (HLD).....	39
4.2	Caracterización morteros de cemento	39
4.2.1	Análisis de ultrasonidos.	39
4.2.2	Porosidad accesible al agua.....	40
4.2.3	Porosidad capilar.....	41

4.3	Análisis termográfico	42
4.3.1	Ensayo de enfriamiento.....	42
4.3.2	Ensayo de calentamiento.....	45
4.4	Ensayos de durabilidad	47
4.4.1	Hielo-deshielo	47
4.4.2	Choque térmico	49
4.4.3	Alteración por sales.....	49
4.5	Análisis termogravimétrico y calorimetría diferencial	52
4.5.1	Pérdida de peso	52
4.5.2	Análisis DSC.....	53
5	Conclusiones y líneas futuras.....	55
5.1	Conclusiones	55
5.2	Líneas futuras	56
6	Bibliografía	57
	Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales	63
	Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Variación de la generación de electricidad bruta en España en 2022 respecto a 2021 [3].	1
Figura 1-2. Funcionamiento PCM [5].	2
Figura 2-1. Consumo energético final de la UE y de España en el año 2019. [6]	5
Figura 2-2. Consumo de energía final en España. Usos no energéticos excluidos [3].	6
Figura 2-3. Consumo energético del sector residencial según fuentes energéticas en España, 2000-2020 [7].	7
Figura 2-4. Esquema de los materiales de cambio de fase [8].	7
Figura 2-5. Clasificaciones materiales de almacenamiento energético.[11]	8
Figura 2-6. Energía almacenada en función de la temperatura en un material SHS.[14]	8
Figura 2-7. Energía almacenada en función de la temperatura en un material LHS [16].	9
Figura 2-8. PCM relación temperatura-entalpía [17].	10
Figura 2-9. Comparativa del volumen necesario para almacenar 1000MJ C con un cambio de temperatura de 15°C [17].	10
Figura 2-10 Componentes de los morteros [20].	11
Figura 2-11. Materiales PCM según entalpía y temperatura de fusión [17].	16
Figura 2-12. Clasificación PCM [37].	16
Figura 2-13. Parafina de calor latente [17].	17
Figura 2-14. Aplicación PCM en edificación [11]	20
Figura 2-15. PCM Microencapsulado [46].	21
Figura 2-16. Esquema PCM microencapsulado [47].	21
Figura 3-1. Morteros de cemento.	23
Figura 3-2. Material de cambio de fase Rubitherm 35 HC.	25
Figura 3-3. Tensión de la señal de salida [50].	26
Figura 3-4. Leeb PCE-2500.	26
Figura 3-5. Índice de anisotropía total.	27
Figura 3-6. Imagen tomada durante la realización del ensayo de ultrasonidos.	27
Figura 3-7. Campana de vacío conectada a un compresor.	28
Figura 3-8. Balanza colocada para la medición del peso hidrostático.	28
Figura 3-9. Muestras sometidas al ensayo de capilaridad	29
Figura 3-10. Cámara FLIR i7.	30
Figura 3-11. Muestras sometidas a saturación en el desecador.	32
Figura 3-12. Muestras sumergidas en las disoluciones.	33
Figura 3-13. Muestras dentro del recipiente en el que se encuentra el KCl.	33

Figura 3-14. Muestras en la estufa a 100 °C.....	34
Figura 3-15. Equipo Labsys Evo 1180 [61].	35
Figura 3-16. Ciclos de variación de temperatura.	36
Figura 3-17. Programación ciclos variación de temperatura.....	36
Figura 3-18. Programación ciclo pérdida de peso.	37
Figura 3-19. Configuración de parámetros.....	37
Figura 4-1. Capilaridad de los morteros de cemento.....	41
Figura 4-2. Morteros al comienzo del ensayo (escala manual).....	43
Figura 4-3. Morteros tras una hora de ensayo (escala automática).	43
Figura 4-4. Morteros tras dos horas (final) de ensayo (escala automática).....	43
Figura 4-5. Gráfica de enfriamiento M0, M1, M2 y M3.....	44
Figura 4-6. Gráfica enfriamiento M4, M5 y M6	44
Figura 4-7. Morteros al comienzo del ensayo (escala manual).....	45
Figura 4-8. Morteros tras una hora de ensayo (escala automática).	45
Figura 4-9. Morteros tras dos horas (final) de ensayo (escala automática).....	46
Figura 4-10. Gráfica de calentamiento M0, M1, M2 y M3.....	46
Figura 4-11. Gráfica calentamiento M4, M5 y M6	47
Figura 4-12. Gráfica del ensayo de hielo-deshielo.....	48
Figura 4-13. Muestras tras 10 ciclos de hielo-deshielo.	48
Figura 4-14. Gráfica ensayo choque térmico	49
Figura 4-15. Gráfica alteración por Na ₂ SO ₄	50
Figura 4-16. Muestras tras 12 ciclos de Na ₂ SO ₄	50
Figura 4-17. Gráfica pérdida de peso por alteración con agua de mar.....	51
Figura 4-18. Gráfica pérdida de peso alteración por NaCl.....	51
Figura 4-19. Pérdida de peso de las muestras M0, M1, M2 y M3.	52
Figura 4-20. Gráfica pérdida de peso M4, M5 y M6.	52
Figura 4-21. Análisis calorimetría diferencial M0, M1 y M2.	53
Figura 4-22. Análisis calorimetría diferencial M0, M3 y M4.	54
Figura 4-23. Análisis calorimetría diferencial M0, M5 y M6.	54

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Ventajas e inconvenientes del almacenamiento energético en forma de calor sensible [15].	9
Tabla 2-2. Propiedades morteros de cemento [28] [29].	13
Tabla 2-3. Ventajas e inconvenientes PCM orgánico [39].	17
Tabla 2-4. Ventajas e inconvenientes PCM inorgánico [39].	18
Tabla 3-1 Composición morteros de cemento.	24
Tabla 3-2. Porcentaje de PCM en cada muestra.	24
Tabla 4-1. Dureza superficial de cada tipo de muestra.	39
Tabla 4-2. Velocidad de ultrasonidos en cada eje.	40
Tabla 4-3. Valores de peso seco, peso saturado y peso hidrostático.	40
Tabla 4-4. Porosidad de los diferentes tipos de morteros de cemento.	41
Tabla 4-5. Peso inicial y final de los morteros de cemento sometidos al ensayo de capilaridad.	42
Tabla 4-6. Porcentaje de agua absorbida por los distintos tipos de morteros al finalizar el ensayo de capilaridad.	42
Tabla 4-7. Pérdida de peso total ensayo termogravimétrico.	53

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción a la situación actual

En la actualidad el consumo energético es un tema que genera una gran preocupación. Esta preocupación se debe en gran parte a la posible escasez energética en un futuro. Distintos organismos internacionales ya están tomando medidas. Estas medidas son necesarias debido a las implicaciones sociales, económicas y medioambientales que tiene el consumo energético. La ONU ha marcado una serie de objetivos a largo plazo, estos objetivos se fundamentan en gran parte en la utilización de energías renovables. La fecha propuesta para alcanzar estos objetivos es el año 2030. Dentro de los objetivos a alcanzar se encuentran asegurar que todos tengan acceso a servicios de energía a un costo razonable, confiables y actualizados, incrementar la proporción de energía proveniente de fuentes renovables en la combinación energética global, duplicar la velocidad a nivel mundial de mejoras en la eficiencia energética, fomentar la cooperación internacional para facilitar el acceso a investigaciones sobre fuentes de energía más limpias y menos contaminantes que los combustibles fósiles, entre otros [1].

España se encuentra entre los países europeos con mayor demanda energética. Según datos del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico en 2019, el consumo energético total alcanzó los 98,7 millones de toneladas equivalentes de petróleo (Mtep). A pesar del incremento en el consumo de energía renovable, que ascendió a 30,4 Mtep ese mismo año, representando el 30,9 % del consumo total, se utilizó un total de 68,3 Mtep en energía no renovable, lo que constituye el 69,1 % del consumo global de energía. Aunque se observa un aumento en la participación de las energías renovables, la diferencia con las no renovables aún sigue siendo considerable [2].

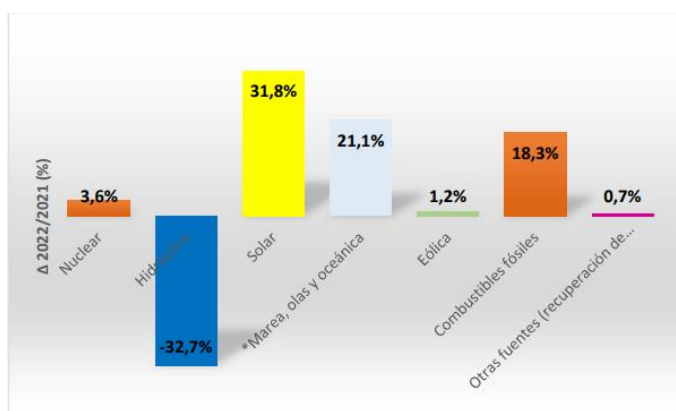


Figura 1-1. Variación de la generación de electricidad bruta en España en 2022 respecto a 2021 [3].

En la Figura 1-1 se puede observar la variación de la generación de electricidad bruta en España durante el año 2022, con respecto a 2021.

El consumo energético en los edificios representa una preocupación creciente debido a su impacto ambiental y a los costos asociados. La demanda de energía para calefacción, refrigeración y ventilación en edificaciones es significativa y está en constante aumento. Este aumento se debe en parte al diseño convencional de los edificios, que a menudo carecen de sistemas eficientes para regular la temperatura interior y minimizar el consumo de energía.

La ineficiencia energética en los edificios no solo contribuye al calentamiento global y al cambio climático, sino que también genera un aumento en los gastos de energía para los propietarios y ocupantes. En este contexto, es imperativo explorar nuevas estrategias y tecnologías que permitan reducir el consumo energético en los edificios y mejorar su eficiencia energética.

Una de estas soluciones innovadoras es el uso de materiales de cambio de fase (PCM). Los PCM tienen la capacidad única de almacenar y liberar calor durante cambios de fase, lo que les permite regular la temperatura interior de los edificios de manera más eficiente. Estos materiales ofrecen una alternativa prometedora a los sistemas convencionales de calefacción y refrigeración, al tiempo que contribuyen a la reducción de la huella de carbono de los edificios y al uso más sostenible de los recursos energéticos disponibles [4].

Los PCM se pueden integrar en una variedad de aplicaciones arquitectónicas y de construcción, desde revestimientos de paredes hasta techos y suelos. Su capacidad de almacenamiento de energía térmica (Figura 1-2) los convierte en una herramienta valiosa para mejorar el confort térmico en los espacios habitables y para promover prácticas de construcción más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente. En este sentido, el estudio y la implementación de los PCM en el diseño y la construcción de edificios representan un paso significativo hacia un futuro más energéticamente eficiente y ambientalmente consciente.

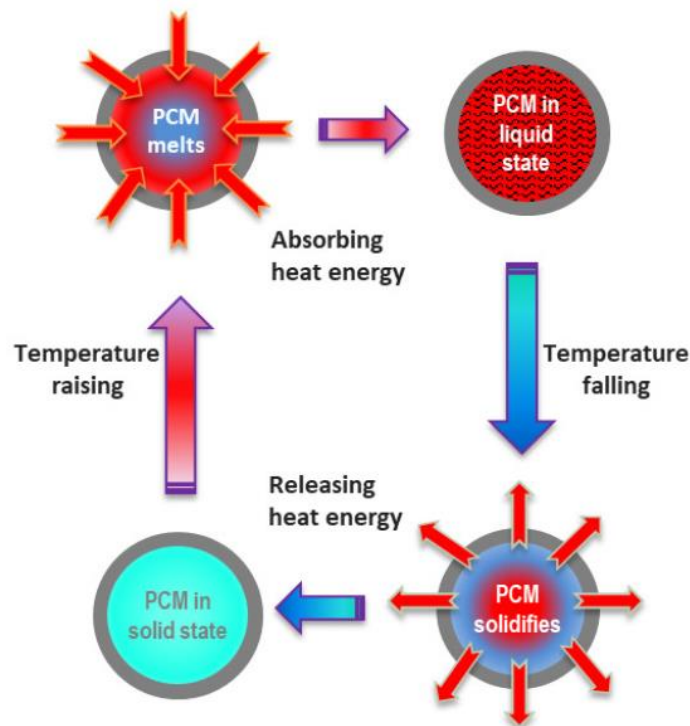


Figura 1-2. Funcionamiento PCM [5].

1.2 Motivación

En el contexto de la creciente preocupación por la eficiencia energética y el fomento del desarrollo sostenible, adquieren especial relevancia aquellos sistemas que permitan aumentar la eficiencia energética reduciendo el consumo de energía y por lo tanto la factura energética. Entre estos sistemas se encuentran los materiales de cambio de fase (PCM).

La motivación que impulsa este trabajo radica en la comprensión profunda de las propiedades excepcionales de los PCM y su potencial impacto en la optimización del consumo energético, particularmente en el ámbito de la construcción. El estudio de estas sustancias, capaces de almacenar y liberar energía en procesos de cambio de fase, busca contribuir de manera significativa al desarrollo de tecnologías innovadoras, comprometidas con la eficiencia y la sostenibilidad ambiental.

1.3 Objetivos

En este trabajo, se explorará en profundidad el uso de PCM en la construcción y su impacto en la eficiencia energética de los edificios. Se analizarán dos tipos de PCM, sus propiedades, aplicaciones y beneficios potenciales en términos de reducción del consumo energético y mejora del confort térmico en los espacios habitables. Además, se examinarán los métodos de integración de PCM en materiales de construcción convencionales y se evaluará su viabilidad técnica y económica en diversos contextos arquitectónicos.

El objetivo principal de este estudio es proporcionar una visión integral sobre el uso de PCM en la construcción y su papel en la búsqueda de soluciones sostenibles para la gestión energética en edificaciones. A través de una revisión exhaustiva de la literatura y posibles experimentos prácticos, se buscará profundizar en el conocimiento existente y contribuir al avance de esta prometedora área de investigación.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Almacenamiento de la energía térmica

2.1.1 Generalidades

En la actualidad, una proporción significativa, cercana al 25 %, de la energía final consumida en Europa se destina al funcionamiento de edificaciones (Figura 2-1). La Comisión Europea ha establecido un firme compromiso para mejorar la eficiencia energética en este sector, con el objetivo de reducir la demanda energética y, en consecuencia, el consumo total de energía. Se busca avanzar hacia la implementación de edificios de consumo de energía casi nulo, como parte de una estrategia más amplia de sostenibilidad. Cabe mencionar que España se encuentra en una posición de desventaja en este ámbito, respecto a países como Francia, Alemania y Bélgica [6].

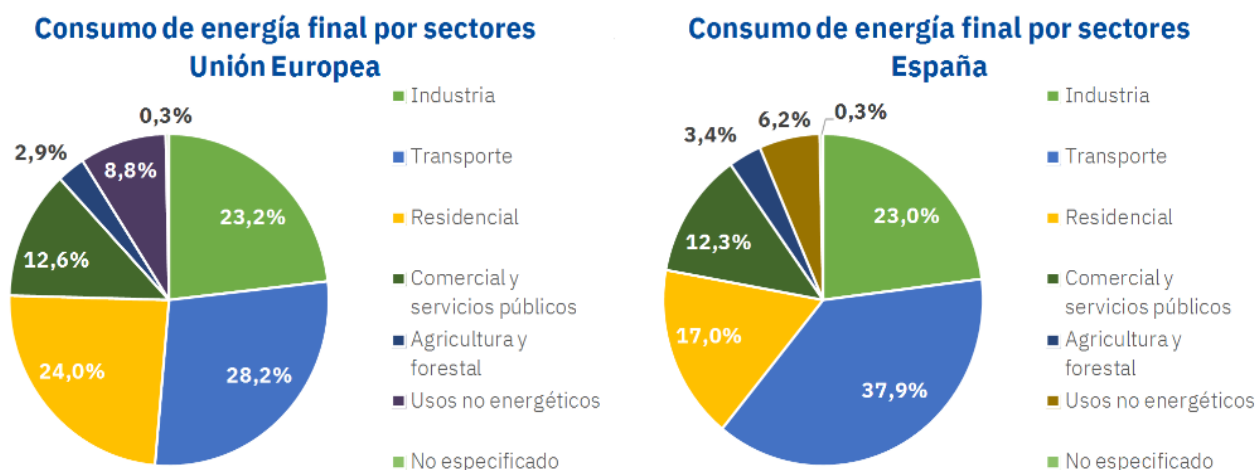


Figura 2-1. Consumo energético final de la UE y de España en el año 2019. [6]

La energía solar lidera la generación con un aumento del 31,8 %, seguida por la energía de mareas, olas y oceánica con un incremento del 21,3 %. En contraste, la generación a partir de combustibles fósiles ha aumentado un 18,7 %. La energía eólica, en comparación, ha experimentado el menor aumento con un 1,2 %. Por otro lado, la generación derivada de la energía hidráulica ha sufrido una disminución notable del 32,7 %. En el transcurso de 2021, se registró un aumento significativo del 7,8 % en el consumo de energía final en comparación con el año anterior, alcanzando un total de 85.602 ktep. Este incremento estuvo mayormente influenciado por el aumento en el consumo de productos petrolíferos,

gas natural y electricidad, como consecuencia de la recuperación económica posterior al impacto del COVID-19.

En 2022, el consumo de energía final apenas aumentó un 0,6 %, llegando a un total de 86.132 ktep. De este valor, 81.086 ktep se destinaron a usos energéticos, mientras que 5.045 ktep se dirigieron a usos no energéticos. La principal razón de este incremento fue el aumento en el consumo final de productos petrolíferos en el transporte, superando ampliamente el notorio retroceso en el consumo de gas natural, especialmente en el sector industrial (Figura 2-2).

Considerando las fuentes de energía, el consumo final de carbón se mantuvo prácticamente estable en 1.252 ktep. Los productos petrolíferos aumentaron hasta 42.193 ktep (+9,2 %) debido al sector del transporte, mientras que la electricidad y el gas natural redujeron su consumo a 12.470 ktep (-16,5 %) y 19.292 ktep (-1,5 %) respectivamente.

Las energías renovables para uso final experimentaron un crecimiento del 1,6 % en 2022, impulsadas principalmente por el uso de la biomasa, que aumentó un 2,9 % [3].

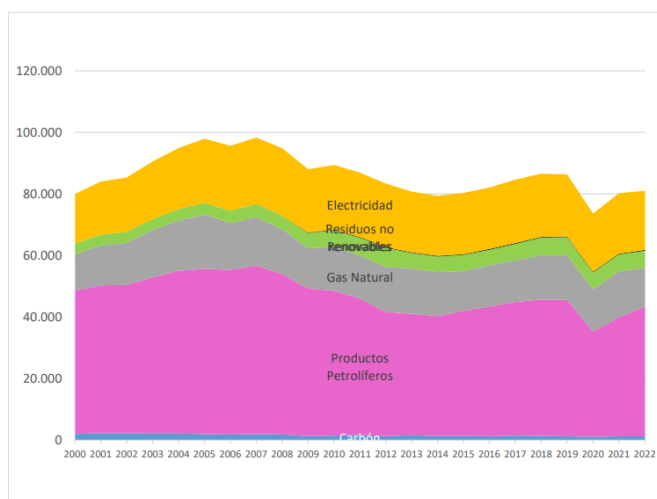


Figura 2-2. Consumo de energía final en España. Usos no energéticos excluidos [3].

La elevación en la demanda residencial, a diferencia de la tendencia decreciente en la mayoría de las actividades productivas, responde a la incertidumbre generada por la evolución de la pandemia. Para hacer frente a esto, se han implementado medidas rigurosas de confinamiento y suspensión de actividades no esenciales, lo que ha llevado a un cambio significativo en el comportamiento de los hogares.

El teletrabajo, en particular, ha experimentado un notorio aumento en 2020, triplicando su utilización en comparación con el periodo previo a la pandemia. A finales de dicho año, aproximadamente el 43,4% de los establecimientos lo adoptaron, con un 37,6% de sus empleados adheridos a esta modalidad. Esta transición ha modificado los hábitos de consumo residencial, con un énfasis en el uso de suministros energéticos debido a la permanencia prolongada en los hogares y la realización de actividades energéticamente demandantes en ellos.

Más del 50 % de la demanda energética de los hogares en España se destina a usos térmicos, como calefacción, agua caliente sanitaria (ACS) y cocina. Esta demanda es mayoritariamente satisfecha con combustibles fósiles (56,4 %), mientras que las energías renovables aportan un 28,4 %. La calefacción es el uso más intensivo, cubriendo más del 40 % de la demanda total. La tendencia general desde 2005 muestra una disminución en la demanda energética promedio por hogar, especialmente en usos térmicos, influida por factores económicos y cambios en los hábitos de consumo tras la crisis de 2008 [7].

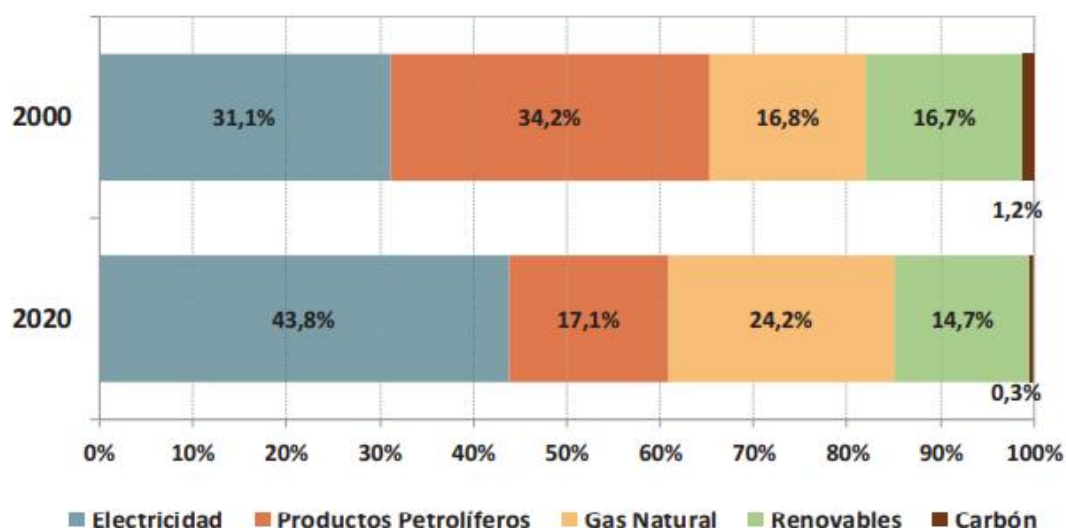


Figura 2-3. Consumo energético del sector residencial según fuentes energéticas en España, 2000-2020 [7].

Esta demanda energética (Figura 2-3) es la que se intentará reducir con la utilización de materiales de cambio de fase. El empleo de materiales de cambio de fase (PCM, por sus siglas en inglés) en la gestión térmica de edificaciones emerge como una estrategia crucial para optimizar el consumo energético y reducir las pérdidas asociadas a la calefacción. Estos materiales poseen la capacidad de almacenar y liberar grandes cantidades de energía durante el proceso de cambio de fase, brindando una solución eficaz para la regulación térmica en el ámbito de la construcción.

La aplicación de PCM en sistemas de calefacción busca mitigar las pérdidas energéticas inherentes al proceso, permitiendo una gestión más eficiente y sostenible. A través de su capacidad para almacenar calor durante fases de baja demanda y liberarlo cuando sea necesario (Figura 2-4), los PCM contribuyen a reducir el consumo de energía eléctrica y, por ende, a disminuir los costos asociados.

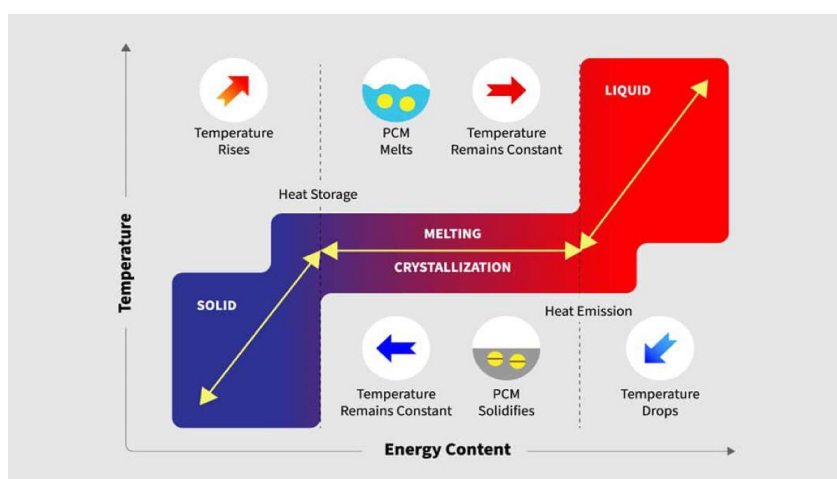


Figura 2-4. Esquema de los materiales de cambio de fase [8].

La implementación del almacenamiento estructural utilizando materiales de cambio de fase representa una innovación tecnológica que promete revolucionar el sector de la construcción, contribuyendo significativamente al ahorro energético en los edificios. Se aspirará a la construcción de edificaciones de consumo prácticamente nulo, las estrategias convencionales centradas en el aislamiento y el control de la ventilación resultan insuficientes. Es necesario integrar fuentes de energía renovable para asegurar el confort térmico.

A pesar de la eficiencia inherente de las energías renovables, su disponibilidad no siempre coincide con la demanda energética. La idea de almacenar energía emerge como una solución para mitigar este desfase entre la oferta y la demanda, acercando ambos componentes y garantizando un suministro energético más estable y eficaz [9] [10].

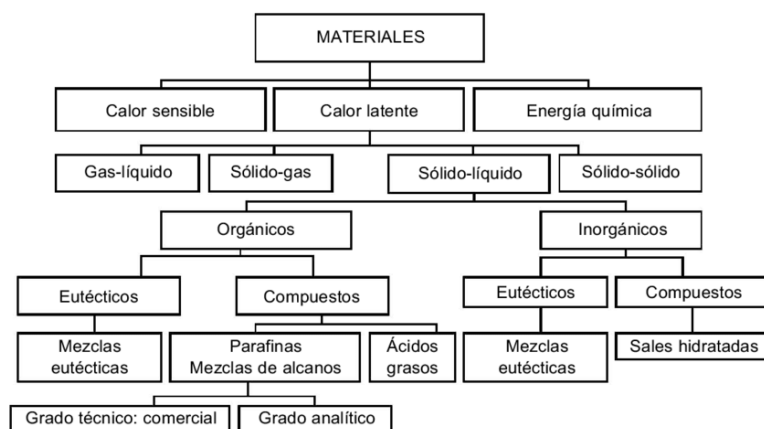


Figura 2-5. Clasificaciones materiales de almacenamiento energético.[11]

A continuación, se examinará de manera más detallada las formas de almacenamiento de la energía térmica, tal como se ilustra en la Figura 2-5.

2.1.2 Almacenamiento en forma de calor sensible (SHS)

Desde la perspectiva de estos sistemas, se produce una alteración en la temperatura, partiendo de un estado sólido o líquido, con el propósito de conservar la energía térmica. Este proceso depende principalmente de la variación de temperatura, el calor específico del medio utilizado y la masa del material de almacenamiento. Es en este tipo de procedimientos para la retención de energía térmica donde la cantidad de calor retenido está directamente relacionada con el calor específico, la densidad, el volumen y la variación de temperatura del material empleado (Figura 2-6) [12] [13].

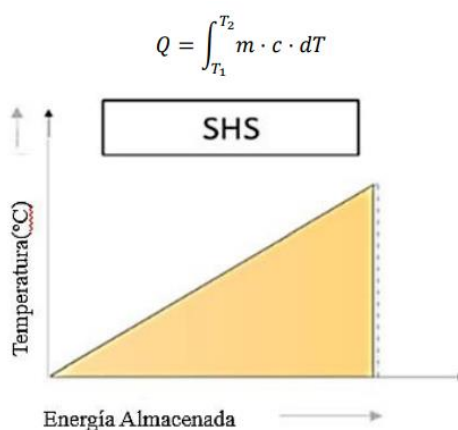


Figura 2-6. Energía almacenada en función de la temperatura en un material SHS.[14]

En la Tabla 2-1 se observan las principales ventajas y desventajas del almacenamiento en forma de calor sensible.

Principales ventajas	Principales inconvenientes
Bajo coste de los materiales	Necesidad de mantener saltos de temperatura constantes
Estabilidad térmica frente a temperaturas elevadas	

Tabla 2-1 Ventajas e inconvenientes del almacenamiento energético en forma de calor sensible [15].

2.1.3 Almacenamiento en forma de calor latente (LHS)

El almacenamiento en forma de calor latente se produce de la siguiente manera; durante el proceso de cambio de fase o estructura atómica en sustancias puras, se lleva a cabo un almacenamiento de energía, generalmente isotérmico. Este proceso implica no solo el calor latente, sino también la acumulación de energía a través del calor sensible. Esta acumulación se produce durante el aumento de temperatura para alcanzar el punto de transición de fase inicial. Posteriormente, tras completarse el cambio de fase, se registra otro aumento de temperatura, destinado a mantener la temperatura del material por encima del punto de transición y evitar pérdidas de energía (Figura 2-7).

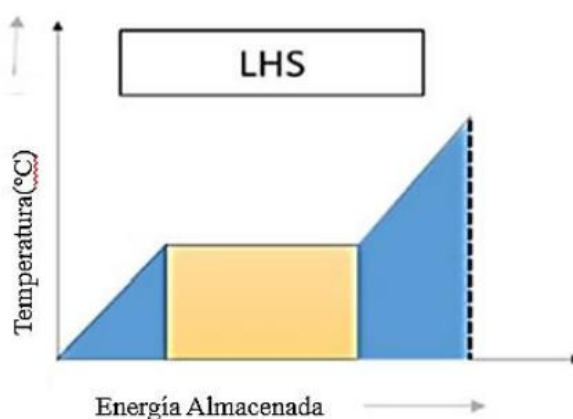


Figura 2-7. Energía almacenada en función de la temperatura en un material LHS [16].

Cuando un sólido experimenta el cambio a estado líquido, necesita absorber una cantidad específica de energía para vencer las fuerzas de cohesión que lo mantienen unido. Esta energía se conoce como calor latente de fusión y representa la entalpía o la diferencia de energía térmica entre ambas fases.

La ecuación de liberación energética viene dada por:

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

Donde Q es el calor liberado o almacenado, m es la masa y el último termino se refiere a la entalpía o calor latente del cambio de fase.

En el ámbito de los cambios de fase, la transición sólido-líquido destaca por su mínima alteración de volumen en comparación con los procesos que involucran el estado gaseoso. Los PCM constituyen un grupo de materiales que experimentan este tipo de transformación. Su densidad de almacenamiento es superior al calor sensible y, gracias a su cambio de fase isotérmico, proporcionan flujos de calor estables. A pesar de estas ventajas, su conductividad térmica suele ser reducida y algunos materiales pueden presentar problemas de compatibilidad, inflamabilidad o corrosión (Figura 2-8) [17].

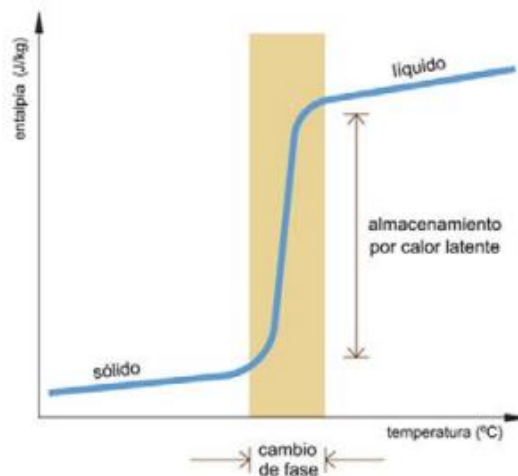


Figura 2-8. PCM relación temperatura-entalpía [17].

Como se puede observar en la Figura 2-9 los materiales de cambio de fase nos ofrecen grandes ventajas en lo que se refiere a almacenamiento energético.

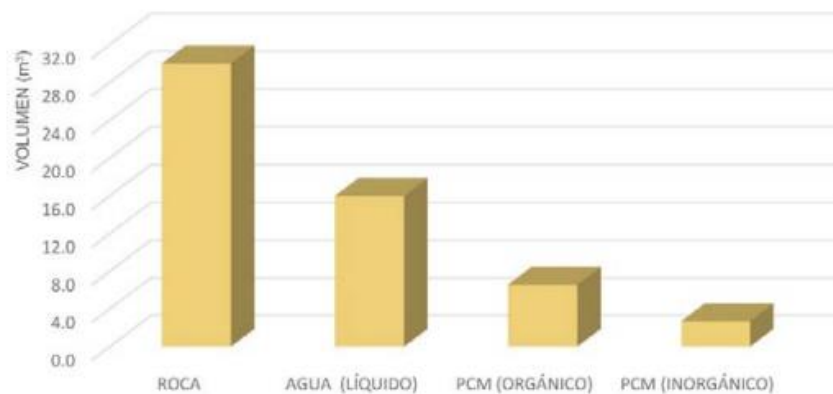


Figura 2-9. Comparativa del volumen necesario para almacenar 1000MJ C con un cambio de temperatura de 15°C [17].

2.1.4 Almacenamiento mediante reacciones termoquímicas (TQS)

Este método de almacenamiento de energía térmica se fundamenta en la utilización del calor como su principal fuente de energía, particularmente proveniente de la energía solar. Su propósito es generar una serie de reacciones químicas, tanto endotérmicas como exotérmicas, que son reversibles. Esta reversibilidad es crucial en este sistema, que comprende tres procesos o fases fundamentales:

- **Carga:** Es un proceso dentro de las TQS donde se emplea una reacción endotérmica para la disociación del material inicial, utilizando la energía absorbida.
- **Almacenamiento:** Pertenece a las TQS y consiste en almacenar los productos de la reacción en condiciones ambientales para evitar pérdidas.
- **Descarga:** Como la última etapa del proceso completo de las TQS, implica la liberación de la energía a través de una reacción exotérmica.

2.2 Morteros

2.2.1 Generalidades

A lo largo de los tiempos, se encuentran pruebas abundantes del uso de morteros para abordar diversas necesidades. Documentos históricos detallan su aplicación como revestimientos aislantes en cisternas, pozos, acueductos y desagües, así como materiales fundamentales en pavimentos y mosaicos. Su versatilidad también se evidenció como revestimientos en paredes internas y externas, y como componentes esenciales para frescos. No obstante, su contribución no se limitaba a eso; actuaban como morteros de unión esenciales en la construcción de estructuras de mampostería.

En el sureste del Mediterráneo, particularmente en la isla de Rodas, la maestría en la creación de morteros alcanzó su apogeo desde el segundo milenio a.C. Esta región exhibe ejemplos notables de aplicaciones arquitectónicas y estructurales que abarcan desde la época helenística y bizantina hasta los periodos de los Caballeros y otomano, persistiendo hasta la actualidad. La preservación meticulosa de reliquias y monumentos históricos no solo ha permitido el muestreo y análisis de morteros antiguos, sino también de aquellos utilizados en intervenciones de restauración en Italia entre las Guerras Mundiales [18].

El término "mortero" se refiere a una amalgama conformada por agua, arena y un agente conglomerante, que puede ser cemento, yeso o cal. Esta combinación se distingue por su homogeneidad y representa uno de los materiales de construcción más robustos disponibles en la actualidad.[19].

2.2.2 Componentes de los morteros

A continuación, se observan los distintos componentes del mortero. Estos se encuentran reflejados en la Figura 2-10.

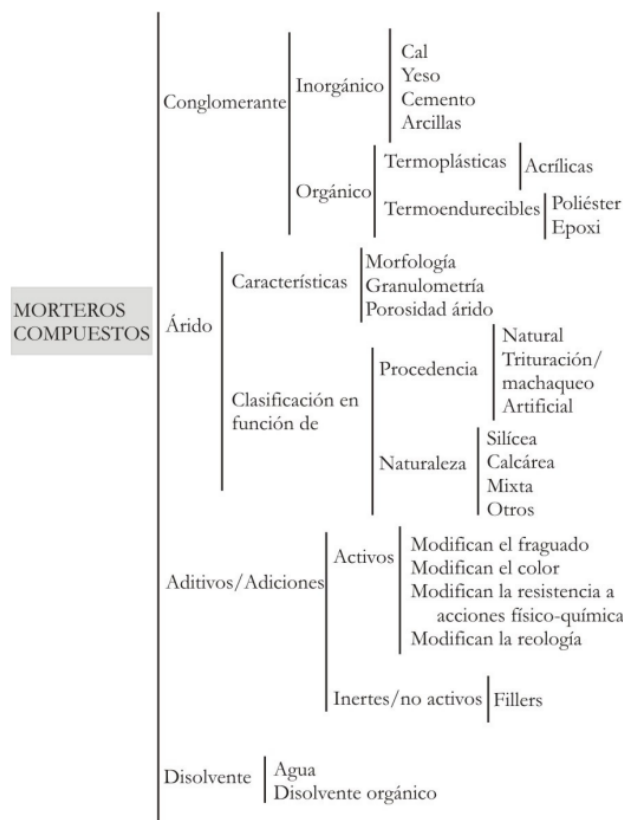


Figura 2-10 Componentes de los morteros [20].

2.2.1.1 Conglomerantes

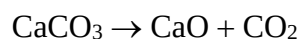
Los conglomerantes tienen la capacidad de unir fragmentos de uno o varios materiales. Al agregar agua, se generan "pastas" conocidas como morteros, que mediante transformaciones químicas (fraguado) dan lugar a nuevos compuestos sólidos. Este proceso no solo crea cohesión estructural, sino que también aporta resistencia y durabilidad a los materiales resultantes. En esencia, los conglomerantes desempeñan un papel crucial al unir y fortalecer materiales a través de cambios químicos específicos [21] [22].

A continuación, se desarrollarán dos tipos de conglomerantes:

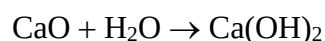
- **Cal**

La materia prima esencial en la producción de cal es la roca caliza, una roca sedimentaria compuesta principalmente por carbonato de calcio (CaCO_3), generalmente calcita, con frecuentes trazas de magnesita (MgCO_3) y otros carbonatos. Además, puede contener pequeñas cantidades de minerales como arcilla, hematita, siderita, cuarzo, entre otros, que pueden afectar el color y la coherencia de la roca.

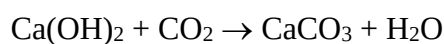
- **Preparación de las materias primas:** las operaciones realizadas en la roca caliza extraída de las canteras incluyen trituración, clasificación y selección.
- **Calcinación:** la roca caliza triturada se somete a altas temperaturas (900-1000 °C) en un horno vertical, lo que resulta en la descomposición de los carbonatos. El producto resultante es la cal viva, conocida como óxido de calcio (CaO).



- **Hidratación:** la cal viva se somete a una primera clasificación. Para su uso, es necesario agregar agua en un proceso llamado "apagado de la cal". Durante esta operación, el óxido de calcio se convierte en hidróxido de calcio (Ca(OH)_2), conocido como cal apagada o cal muerta. Es crucial realizar esta operación con precaución debido a la fuerte reacción química exotérmica que tiene lugar.



- **Carbonatación:** es un proceso intrínseco del mortero de cal que se desarrolla con el tiempo. En este fenómeno, el mortero reacciona con el dióxido de carbono (CO_2) presente en la atmósfera. Esta transformación tiene lugar desde la superficie hacia el interior del mortero, manteniendo un núcleo húmedo que le confiere sus propiedades y elasticidad. Gracias a esta flexibilidad, el mortero exhibe un comportamiento más adaptable y se transforma en una capa sólida de carbonato cálcico, semejante a la piedra original, pero con menos impurezas [23].



Respecto a sus aplicaciones, la cal demuestra su versatilidad en diversas áreas:

- **Morteros Tradicionales:** Ya sea en forma pura o combinada con cemento, la cal revela propiedades plásticas que la hacen esencial en la mezcla.
- **Encalados:** Este método económico embellece muros y techos con pintura bioclimática, aplicada con brocha gorda sobre adobes o tapial, destacando la destreza artística en la utilización de "lechada de cal" o cal en pasta.
- **Revestimientos de Acabado:** Las mezclas de yeso y cal fortalecen la maniobrabilidad, adhesión y resistencia mecánica en interiores y exteriores, desafiando el desarrollo bacteriológico y la formación de moho.
- **Hormigones Ciclópeos de Cal:** Utilizados en la construcción de muros de tapia, fusionan la robustez de la cal con la solidez del canto.

- **Estabilización de Suelos:** La cal transforma propiedades de suelos arcillosos, secando húmedos y descongelando helados.
- **Prefabricados de Cal:** Soluciones modernas como hormigón celular, ladrillos silico-calcáreos y bloques de tierra comprimida resaltan la versatilidad de la cal en la construcción contemporánea [24].

• **Cemento**

Este material, arraigado en la historia desde la antigua Grecia y Roma, se configura como una amalgama de caliza y arcilla, sometidas a altas temperaturas para generar cal viva. Al quedar químicamente vinculado con la arcilla, se le denomina Clinker, constituyendo el componente principal del cemento. Su producción parte de un polvo enriquecido con aditivos, denominado crudo, que experimenta elevadas temperaturas en un horno [22].

El cemento, complejo en su composición, tiene como elemento primordial la caliza, elegida por su alto contenido en el crudo presente en rocas carbonáticas, aproximadamente un 75%. También integra compuestos secundarios conocidos como correctores, de bajo contenido en el crudo, aportando elementos químicos necesarios para obtener un crudo de calidad. Finalmente, el yeso y la anhidrita actúan como reguladores de fraguado y componentes fundamentales del cemento [25] [26].

Dentro de las variedades de cemento se encuentran [27].

- **Cemento Portland blanco:** Puro y de tonalidad clara, destinado a construcciones que requieren un acabado uniforme y brillante.
- **Cemento de albañilería:** Más denso y de color gris, empleado en la construcción de mampostería, bloques y ladrillos.
- **Cementos aluminosos:** Con alto contenido de aluminato de calcio, destacan por su resistencia a la corrosión y la oxidación.
- **Cementos puzolánicos:** Enriquecidos con materiales puzolánicos como escorias de alto horno o ceniza volante, mejoran la resistencia y durabilidad del cemento.
- **Cementos resistentes a sulfatos:** Diseñados específicamente para resistir la acción de sulfatos presentes en suelos y aguas, ideales para entornos con elevados niveles de sulfatos, como zonas cercanas al mar.

Ventajas	Inconvenientes
Elevada resistencia mecánica y módulo elástico	Sales solubles e iones libres
Elevada dureza	Elevada dilatación térmica
Fraguado rápido	Alta densidad y conductividad térmica
Baja porosidad	Humedades de condensación

Tabla 2-2. Propiedades morteros de cemento [28] [29].

2.2.1.2 Áridos

Los materiales pétreos, ya sea arena o rocas fragmentadas, desempeñan un papel esencial en el ámbito minero, tanto en España como a nivel global. Estos recursos posibilitan la construcción de una variedad de estructuras, desde edificaciones hasta calles, carreteras y aeropuertos. En términos más comunes, nos referimos a estos elementos como grava, arena y gravilla.[30]

Los áridos deben cumplir con características específicas según su destino final, ya sea de índole petrográfica o resultado de un proceso de producción particular. Entre las propiedades esenciales se encuentran [31]:

- **Propiedades geométricas:** Incluyen tamaño, forma y textura de las partículas, considerando aspectos como alargamiento y presencia de caras de fractura. Se valora la adhesión con la pasta, favoreciendo formas rugosas y angulares.
- **Propiedades mecánicas y físicas:** Engloban resistencia al desgaste, fragilidad, densidad, porosidad y contenido de agua. Factores cruciales para su uso en construcción, como la resistencia al desgaste para evitar deslizamientos.
- **Propiedades térmicas y de alteración:** Evalúan la resistencia a ciclos de congelación y descongelación, así como la capacidad para resistir la degradación en condiciones climáticas adversas.
- **Propiedades químicas:** Incluyen contenido de azufre, cloruros, materia orgánica y otros aspectos que afectan la integridad y seguridad en la construcción. Cumplir con estándares es esencial para garantizar durabilidad y seguridad.
- **Adherencia pasta-árido:** La calidad de los morteros se ve afectada por la naturaleza, forma, textura y composición química de los áridos. Durante la carbonatación, se forma carbonato de calcio, lo que destaca la importancia de utilizar áridos de alta calidad y controlar el proceso para asegurar construcciones duraderas y seguras.

2.2.1.3 Aditivos

A lo largo de la historia, se ha buscado perfeccionar las propiedades del mortero para adaptarlo a diversas aplicaciones y entornos. Desde tiempos remotos, se han introducido sustancias llamadas aditivos con el fin de alterar estas propiedades. Los polímeros y sus monómeros, en formas como látex, resinas líquidas o soluciones acuosas, se han empleado para mitigar la aglomeración entre el agua y el cemento, mejorando así la maleabilidad del mortero. Durante el proceso de hidratación, las partículas de polímero envuelven las del cemento, dando lugar a una fase gelatinosa junto con los agregados, lo que resulta en una notoria mejora en la fluidez del mortero. Conforme a la regulación UNE-83-200-84, los aditivos son compuestos que alteran las características o el desempeño de los morteros, hormigones o pastas frescas o endurecidas a las que se les han incorporado [32] [33].

Los aditivos para morteros se clasifican según sus efectos, que abarcan desde mejorar la manejabilidad y reducir el contenido de agua, hasta controlar la permeabilidad y la corrosión del acero. También regulan la expansión por la reacción alcalina de los agregados y mejoran el acabado final del mortero. A continuación, se observa su clasificación en la Tabla 2-3. Clasificación de los aditivos [34] [33]Tabla 2-.

Clasificación	Función
Acelerantes	Endurecimiento temprano y desarrollo de la resistencia inicial. (CaCl ₂)
Reductores de aire	Reducen la cantidad de aire presente en la mezcla. (Siliconas)
Incorporadores de aire	Mejoran durabilidad ante ciclos de congelación. (Detergentes sintéticos)
Antiadherentes	Ambientes submarinos. (Polímeros acrílicos)
Aditivos adhesivos	Incrementan la fuerza de adhesión (Acetato de polivinilo)
Aditivos colorantes	Pigmentación. (TiO ₂)
Inhibidores de corrosión	Reducen la corrosión. (Ca(NO ₂) ₂)
Impermeabilizantes	Reducen la capacidad de penetración de la humedad. (NH ⁺ ₄)
Agentes de espumado	Producción de espuma en concretos de densidad baja (Surfactantes catiónicos)
Fungicidas	Evitan el crecimiento de hongos. (Cu)
Formadores de gas	Causan expansión antes del ajuste. (Polvo de aluminio)

Tabla 2-3. Clasificación de los aditivos [34] [33]

2.2.1.4 Disolventes

Los disolventes en los morteros desempeñan un papel esencial al influir en su consistencia, tiempo de fraguado y durabilidad. Tanto los orgánicos, como el agua, como los inorgánicos, como ciertos ácidos y bases, se emplean para ajustar las propiedades del mortero según las necesidades específicas de cada aplicación. La elección del disolvente adecuado depende del tipo de mortero y del entorno de aplicación, ya que un uso inadecuado puede resultar en una reducción de la resistencia o en la formación de grietas. Por tanto, su manejo cuidadoso es crucial para garantizar resultados óptimos en términos de rendimiento y durabilidad del mortero [35].

2.3 Materiales de cambio de fase (PCM)

2.3.1 Generalidades

En los últimos años, ha surgido un notable interés en la investigación y desarrollo de materiales capaces de almacenar energía en diversas formas, como calor latente, calor sensible o a través de reacciones termoquímicas.

Este impulso hacia la búsqueda de materiales energéticamente eficientes se remonta a la década de los años 70, cuando comenzó a surgir una conciencia colectiva sobre la necesidad de aprovechar recursos naturales para mejorar la eficiencia energética. Desde entonces, se ha prestado especial atención a la exploración de materiales naturales con potencial para almacenar y liberar energía de manera eficiente.

Estos materiales encuentran una amplia gama de aplicaciones en el ámbito de la construcción, adaptándose a las necesidades específicas de cada proyecto y contribuyendo a la sostenibilidad energética. Por ejemplo, los materiales de cambio de fase (PCM, por sus siglas en inglés) han demostrado ser especialmente útiles en aplicaciones como la refrigeración urbana, la regulación de las variaciones térmicas en edificios y el almacenamiento de energía térmica solar. Su capacidad para adaptarse a diferentes temperaturas de transición los convierte en una opción versátil para el almacenamiento de energía térmica.

En resumen, la investigación y desarrollo en el campo de los materiales de almacenamiento de energía han abierto nuevas posibilidades para mejorar la eficiencia energética y avanzar hacia un futuro más sostenible.

Es posible categorizar los diversos materiales que experimentan cambios de fase según su temperatura característica, con el propósito de evaluar la eficacia de cada uno en la retención de energía mediante el calor latente (Figura 2-8) [36].

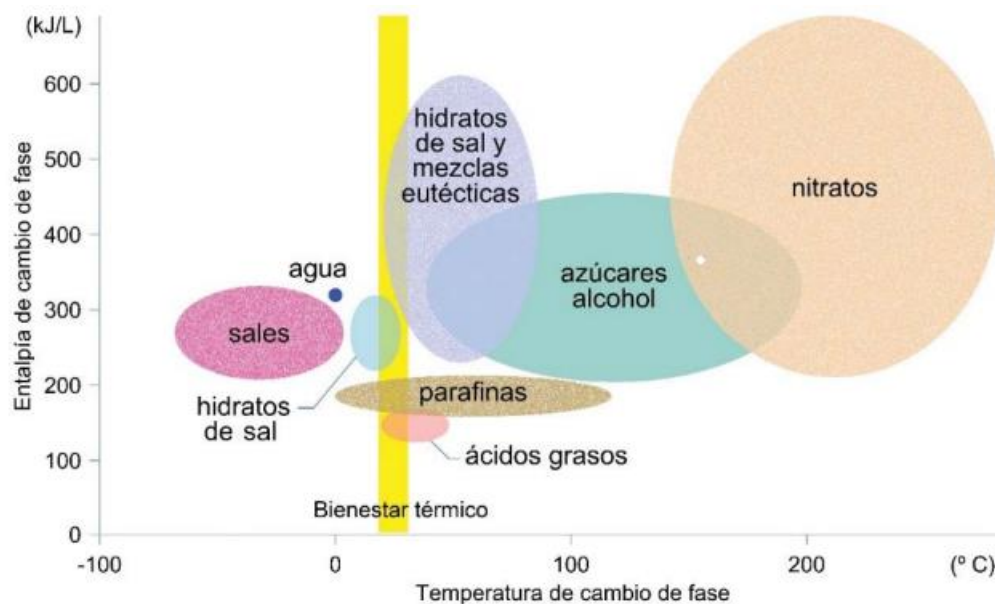


Figura 2-11. Materiales PCM según entalpía y temperatura de fusión [17].

2.3.2 Clasificación PCM

Esta clasificación se puede observar en la Figura 2-12.

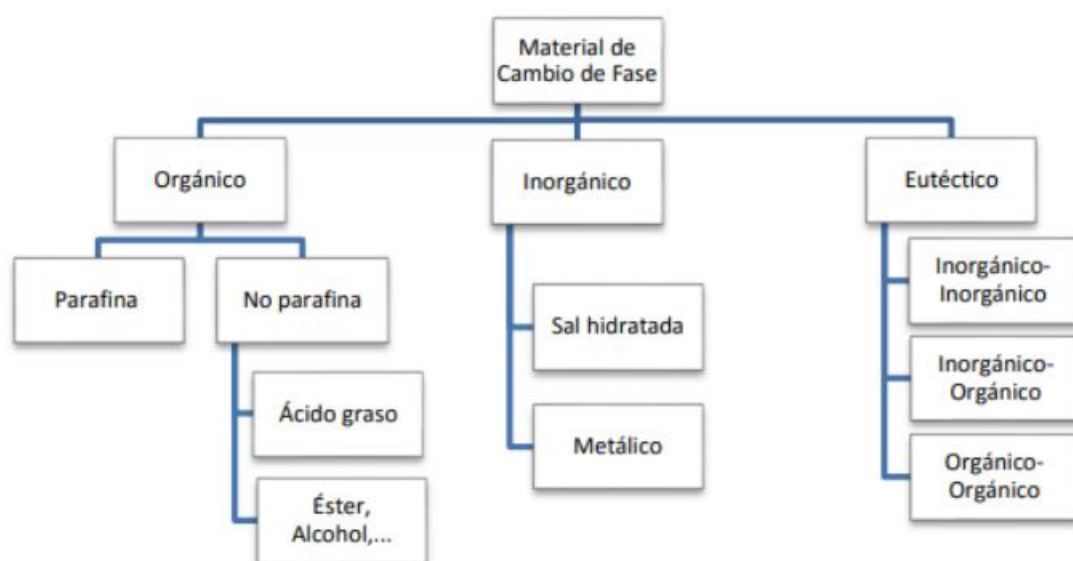


Figura 2-12. Clasificación PCM [37].

2.3.2.1 Orgánicos

Los PCM orgánicos destacan por sus propiedades útiles en la aplicación en ciertos elementos de construcción para el almacenamiento de calor latente. Son químicamente más estables que las sustancias inorgánicas, se funden y solidifican de manera adecuada sin requerir agentes nucleadores, y no experimentan subenfriamiento ni histéresis. Sin embargo, se ha evidenciado que son más compatibles y adecuados para la adsorción en diversos materiales constructivos [38].

En la Tabla 2-3 se pueden ver las principales ventajas y desventajas de los PCM orgánicos.

Ventajas	Inconvenientes
No corrosivos	Baja entalpia de cambio de fase
No existe subenfriamiento	Baja conductividad térmica
Estabilidad química y térmica	Inflamables

Tabla 2-3. Ventajas e inconvenientes PCM orgánico [39].

Parafinas

Las parafinas (Figura 2-13), compuestas principalmente por cadenas lineales de hidrocarburos, destacan como elementos fundamentales en la creación de materiales de cambio de fase orgánicos (PCM). Su estructura molecular y propiedades intrínsecas las convierten en candidatas ideales para el almacenamiento de energía térmica. Estos materiales PCM orgánicos, con parafinas como componentes principales, ofrecen una versatilidad única en diversas aplicaciones. Su estabilidad química garantiza una transición de fase suave y confiable, sin la necesidad de agentes adicionales para inducir la cristalización.

Además, las parafinas no exhiben subenfriamiento significativo ni histéresis durante el proceso de fusión y solidificación, lo que los hace altamente eficientes en la absorción y liberación de calor latente. Su compatibilidad con una variedad de sustratos y materiales de construcción los convierte en una opción atractiva para la integración en sistemas de gestión térmica en edificaciones y estructuras. La capacidad de las parafinas para adaptarse a diferentes entornos y requerimientos de diseño los posiciona como elementos clave en la búsqueda de soluciones sostenibles y eficientes en el campo de la gestión energética [40].



Figura 2-13. Parafina de calor latente [17].

Ácidos grasos

Los ácidos grasos, compuestos químicamente estables, emergen como elementos esenciales en la creación de materiales de cambio de fase orgánicos (PCM). Su estructura molecular y propiedades intrínsecas los convierten en candidatos ideales para el almacenamiento de energía térmica en una variedad de aplicaciones. Estos PCM orgánicos, basados en ácidos grasos, ofrecen una serie de ventajas significativas en el campo de la gestión térmica. Su estabilidad química garantiza una transición de fase suave y confiable, sin la necesidad de aditivos especiales para inducir la cristalización.

Los ácidos grasos presentan una amplia gama de puntos de fusión, lo que los hace adecuados para adaptarse a diferentes rangos de temperatura y requisitos de aplicación. Su capacidad para absorber y liberar calor latente de manera eficiente los convierte en una opción atractiva para sistemas de control térmico en edificaciones, vehículos y dispositivos electrónicos. Tienen capacidad para integrarse en una variedad de materiales y sustratos, lo que permite su aplicación en una amplia gama de escenarios de diseño y construcción.

En resumen, los ácidos grasos representan una solución prometedora en la búsqueda de materiales innovadores y sostenibles para la gestión térmica, destacando por su estabilidad, eficiencia y versatilidad en diversas aplicaciones industriales y residenciales [41].

2.3.2.2 Inorgánicos

Las principales ventajas e inconvenientes de los materiales de cambio de fase inorgánicos se pueden ver en la Tabla 2-4.

Ventajas	Inconvenientes
Mayor conductividad térmica	Posible subenfriamiento
Mayor calor de fusión	Posible segregación
Menor cambio de volumen	Corrosivos
No inflamable	Necesidad de utilización de aditivos

Tabla 2-4. Ventajas e inconvenientes PCM inorgánico [39].

Sales hidratadas

Las sales hidratadas, como PCM inorgánico, son una innovadora solución en la gestión térmica. Estos compuestos exhiben propiedades únicas ideales para almacenar y liberar calor eficientemente. A diferencia de otros PCM inorgánicos, las sales hidratadas tienen una estructura cristalina que les permite absorber grandes cantidades de calor durante la fusión, a temperaturas bien definidas. Este proceso facilita su integración en sistemas de control térmico y garantiza una eficiencia excepcional en la gestión térmica.

La capacidad de las sales hidratadas para almacenar calor es impresionante. Durante la fusión, las moléculas de agua se liberan o se absorben, generando una liberación significativa de energía. Esta característica, junto con su estabilidad química y larga vida útil, las convierte en una opción atractiva para aplicaciones de energía renovable y almacenamiento de calor. Su naturaleza inorgánica les permite resistir condiciones ambientales adversas y ciclos repetidos de carga y descarga térmica sin degradación significativa, lo que las hace una herramienta invaluable en la gestión eficiente de la energía [42].

Metales

Los PCM inorgánicos, compuestos por metales puros y aleaciones, destacan por su densidad y conductividad, lo que los diferencia de los PCM convencionales. Aunque su peso limita ciertas aplicaciones, resultan ideales para aquellas que requieren alta densidad y capacidad calorífica. Su elevado calor de fusión por unidad de volumen y sus altas conductividades los convierten en una opción valiosa para aplicaciones específicas que demandan estas propiedades.

Estos materiales inorgánicos ofrecen un rendimiento superior en términos de almacenamiento de energía térmica, garantizando una mayor eficiencia en sistemas que requieren una alta capacidad de absorción y liberación de calor. Su composición y características físicas los convierten en una alternativa atractiva en el diseño de soluciones innovadoras para el control térmico en una variedad de aplicaciones industriales y comerciales [43].

2.3.2.3 Mezclas eutécticas

Un compuesto eutéctico representa una fusión armónica de dos o más materiales de cambio de fase, donde cada componente se funde y solidifica con precisión. Estos compuestos exhiben una estabilidad notable en su estado líquido, con puntos de fusión específicos, y ciertas combinaciones ofrecen una capacidad de almacenamiento de energía térmica superior a las parafinas y sales hidratadas. Además, su aplicación en superficies porosas resulta fácil y efectiva, ofreciendo un potencial significativo en diversas aplicaciones [44].

2.3.3 PCM en la edificación

En el ámbito de la edificación, la aplicación de materiales de cambio de fase se divide en dos formas principales:

- **Aplicación Activa:** En esta modalidad, los PCM se integran en elementos activos de la construcción, como sistemas de aire acondicionado, calefacción, tanques de agua caliente y placas solares. Estos sistemas almacenan energía térmica de forma independiente al edificio. Los sistemas de acumulación de energía térmica por calor latente (TES) utilizan esta energía según la demanda o para lograr un equilibrio energético entre las necesidades del edificio y el suministro.

- **Aplicación Pasiva:** Por otro lado, la aplicación pasiva se refiere a la incorporación de PCM en elementos constructivos pasivos cuyo objetivo principal es proporcionar acondicionamiento y confort óptimos sin consumo energético externo. En este caso, la energía térmica se almacena y libera automáticamente cuando la temperatura interior o exterior no coincide con el punto de fusión del PCM. Estos materiales pueden aplicarse en muros o paredes compuestas por diferentes materiales, permitiendo reducir las variaciones de temperatura y lograr una mayor estabilidad y eficiencia energética.

2.3.3.1 PCM en materiales de construcción

Con el fin de optimizar el bienestar térmico en los edificios, se puede implementar un sistema para retener energía en las estructuras de las paredes, techos y suelos. Esto se logra mediante la introducción de materiales de cambio de fase en los elementos de construcción (Figura 2-14). La integración de estos materiales en los componentes constructivos puede realizarse de diversas maneras.

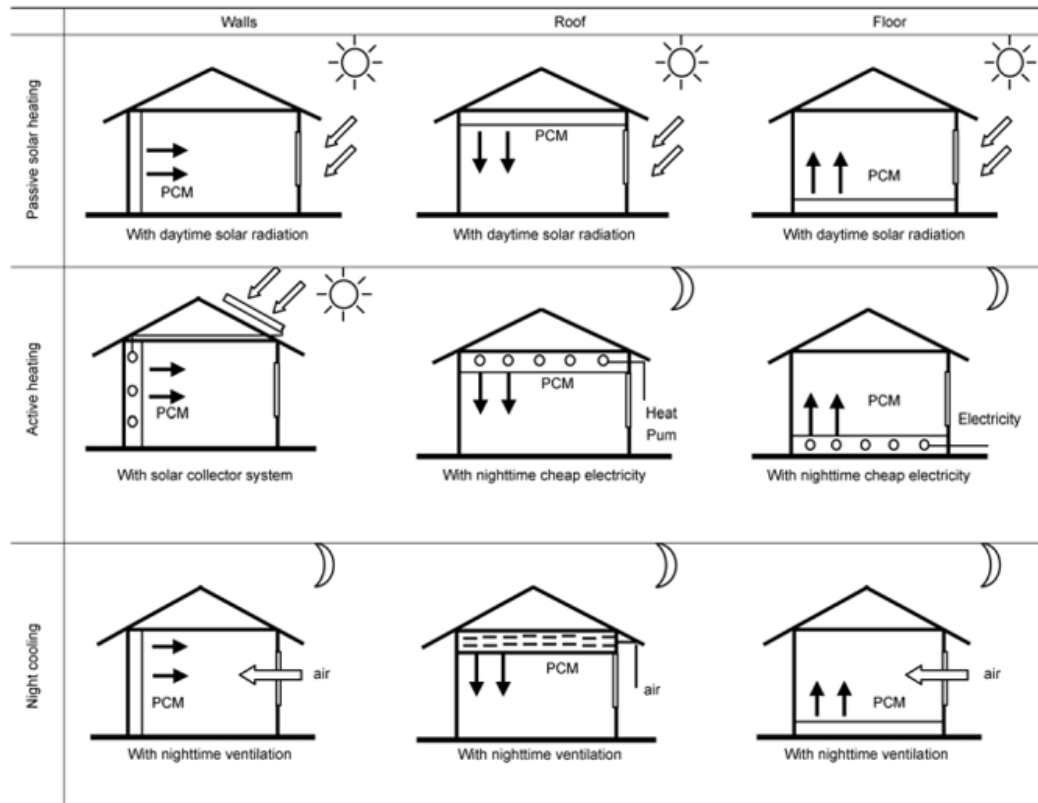


Figura 2-14. Aplicación PCM en edificación [11]

- Aplicación Directa:

En esta estrategia, los PCM, ya sea en forma líquida o en granos sólidos, se integran directamente en la fabricación de materiales de construcción como un componente adicional durante su proceso de producción. Por ejemplo, se pueden añadir a la fabricación de placas de yeso o de hormigón. La resistencia de estos materiales se ve afectada por sus composiciones, y generalmente, la resistencia de las placas de yeso no disminuye significativamente si contienen menos del 20% del peso de PCM [45].

- Encapsulado:

La incorporación de PCM en los materiales de construcción, especialmente los de tipo sólido-líquido, ha enfrentado desafíos que han llevado al desarrollo de técnicas de encapsulado. Dos métodos principales han surgido de esta necesidad:

- *Microencapsulado*: Este proceso implica envolver partículas pequeñas de PCM, ya sea en estado sólido o líquido, con una cápsula sólida, típicamente un polímero esférico. Estas cápsulas, de tamaño entre $1\mu\text{m}$ y $100\mu\text{m}$, tienen varias funciones que incluyen evitar pérdidas de material, problemas de estabilidad y estéticos, corrosión, entre otros. En la Figura 2-15. PCM Microencapsulado [46]Figura 2-15 se puede ver la incorporación de material de cambio de fase microencapsulado.

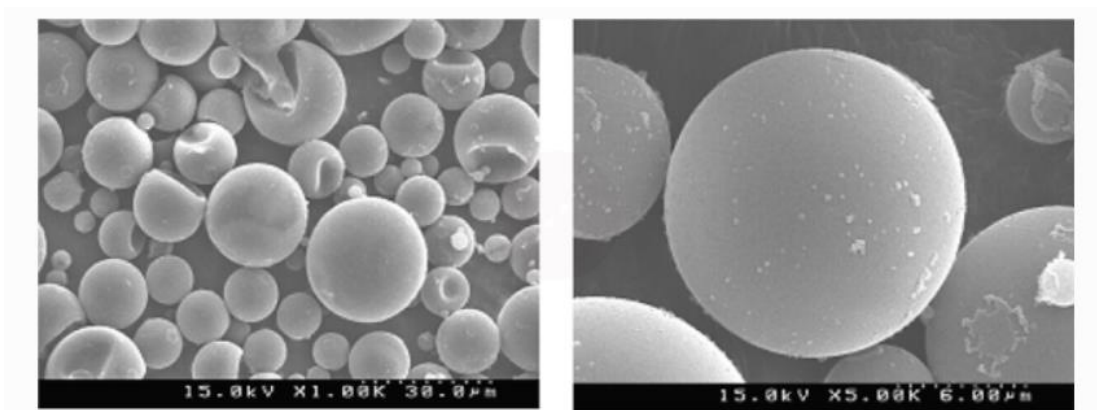


Figura 2-15. PCM Microencapsulado [46].

A continuación, en la Figura 2-16 se puede ver como es el funcionamiento del PCM microencapsulado de una manera más gráfica.

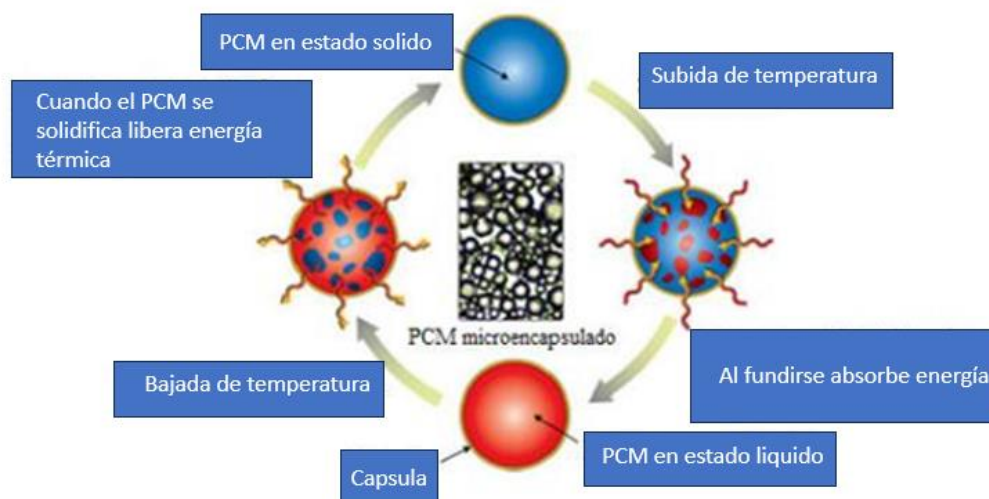


Figura 2-16. Esquema PCM microencapsulado [47].

- *Microencapsulado*: Se trata del empaquetamiento del PCM en elementos de diferentes formas, como tubos, esferas o paneles, que se incorporan a los materiales de construcción. Estos elementos, de diferentes colores, pueden regular la temperatura y se utilizan principalmente en materiales de estructura porosa como ladrillos, placas de yeso y bloques de hormigón [48].

Inmersión

Esta técnica implica sumergir los materiales de construcción porosos en PCM fundido, que luego es absorbido por los poros del material. Una vez que se llena el material por capilaridad, se deja enfriar hasta que el PCM se solidifica. Sin embargo, este proceso puede ser afectado por la temperatura de fusión, la viscosidad del material y el tamaño de los poros, lo que puede resultar en la necesidad de encapsular y proteger adecuadamente los PCM, especialmente en el caso de materiales como los ácidos grasos, para evitar posibles fugas [37].

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Materiales

3.1.1 Morteros de cemento

Para la realización de este trabajo se han utilizado diferentes morteros de cemento, con la finalidad de llevar a cabo una serie de ensayos. Se han utilizado siete cubos de diferentes composiciones (cada tipo de muestra cuenta con ocho réplicas para lograr una mayor exactitud de medición), dos cilindros de diferentes composiciones (con dos réplicas de cada tipo) y un vaso.



Figura 3-1. Morteros de cemento.

En cuanto a las medidas, se han realizado mediciones en cada muestra debido a que existe una ligera variación ya que la confección de los cubos no es perfecta. En líneas generales se puede decir que las medidas son las siguientes:

- Cubos: 4,83 cm de lado
- Cilindros: $\varnothing_{superior} = 4,5 \text{ cm}$; $\varnothing_{inferior} = 5,75 \text{ cm}$; $h = 14,82 \text{ cm}$
- Vasos: $\varnothing_{superior} = 4,81 \text{ cm}$; $\varnothing_{inferior} = 6,43 \text{ cm}$; $h = 8,25 \text{ cm}$

Tomando en consideración las notables ventajas y la amplia disponibilidad que ofrece el cemento para este tipo de estudios, se ha utilizado para la elaboración de las diversas muestras de los morteros.

Dichos morteros están compuestos por el cemento, los áridos y el agua. Cada tipo de mortero se diferencia por el tipo y la cantidad de PCM que lleva incorporado.

En la Tabla 3-1 se puede observar la composición de las diferentes muestras de morteros de cemento:

	M0	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Arena (kg)	2,9635	2,9635	2,9615	2,9655	2,9650	2,9650	2,9645
Cemento (kg)	0,7885	0,7875	0,788	0,790	0,789	0,7875	0,7905
Agua (mL)	610	610	610	610	610	610	610
PCM RT18	-	-	-	0,0790	0,1580	0,0395	0,0790
PCM RT35	-	0,0790	0,1580	-	-	0,0395	0,0790

Tabla 3-1 Composición morteros de cemento.

3.1.2 PCM

El enfoque del proyecto se centra en analizar cómo los materiales de cambio de fase (PCM) influyen en las propiedades del mortero. Se optó por emplear Rubitherm 35 (RT35) y Rubitherm 18 (RT18), seleccionados por su potencial aplicabilidad en materiales de construcción. Estos números, que indican el tipo de RT, corresponden a la temperatura aproximada de fusión del PCM. La integración de estos materiales en el mortero se llevó a cabo de la siguiente manera:

Para el RT35, cuya temperatura de fusión ronda los 35 °C, se utilizó en estado sólido y fue necesario tritularlo en polvo fino para asegurar una mezcla homogénea con el resto del mortero de cal y cemento.

Por otro lado, el RT18, con una temperatura de fusión cercana a los 18 °C, se conservaba en estado líquido a temperatura ambiente. Se incorporó al resto de los materiales en esta forma líquida, facilitando su integración en la mezcla.

Cada muestra tiene un porcentaje distinto de cada tipo de PCM. Esta distribución de porcentajes se puede observar en la Tabla 3-2.

	M0	M1	M2	M3	M4	M5	M6
PCM RT18	-	-	-	10 %	20 %	5 %	10 %
PCM RT35	-	10 %	20 %	-	-	5 %	10 %

Tabla 3-2. Porcentaje de PCM en cada muestra.

Entre las características más destacadas de estos materiales se encuentran:

- Almacenamiento eficiente de energía térmica: Exhiben una capacidad notable para absorber y liberar grandes cantidades de calor, lo que les permite regular la temperatura ambiente tanto durante el día como durante la noche.
- Composición avanzada: Están constituidos por microcápsulas de parafina suspendidas dentro de un polímero, lo que les otorga una estabilidad excepcional y una durabilidad sobresaliente en diversas condiciones ambientales.
- Versatilidad en su aplicación: Son compatibles con una amplia variedad de materiales de construcción, incluyendo paneles de yeso, pinturas, y sistemas de aislamiento.

- Eficiencia energética mejorada: Al regular la temperatura interna de los edificios, estos materiales contribuyen significativamente a reducir el consumo de energía destinada a calefacción y refrigeración, lo que puede resultar en importantes ahorros económicos y ambientales.
- Impacto positivo en la sostenibilidad: La inclusión de PCM en proyectos de construcción puede generar beneficios sustanciales en términos de sostenibilidad, al reducir tanto el consumo de energía como las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con la climatización de edificios.



Figura 3-2. Material de cambio de fase Rubitherm 35 HC.

3.2 Metodología experimental

3.2.1 Análisis de dureza superficial

La resistencia al impacto de un material se refiere a su capacidad para soportar golpes y absorber energía sin sufrir daños significativos o romperse. Esta propiedad es crucial en numerosas aplicaciones donde el material está expuesto a fuerzas externas, y su resistencia puede variar según la temperatura y la estructura del material. Es fundamental evaluar y entender esta característica para garantizar la durabilidad y la integridad de los componentes en diversas condiciones de uso y entornos [49].

El proceso de medición que guía este tipo de evaluaciones es conocido como Equotip (Energy Quotient and Tip). Este dispositivo se caracteriza por la relación entre la velocidad de un percutor y mil veces su velocidad de impacto. En general, a mayor dureza superficial del material, mayor será la velocidad de rebote registrada. Para un conjunto dado de materiales, la dureza Leeb establece una relación directa con sus propiedades de dureza. El percutor está compuesto por un carburo de metal que choca con la superficie de la pieza y rebota. Tanto el rebote como la velocidad de impacto se miden a 1 mm de la pieza, mientras que el imán Hill integrado genera una tensión proporcional a la velocidad del impacto. En la Figura 3-3 se puede ver la fórmula que nos dará como resultado el valor de dureza Leeb (HL). También se observa en la fórmula la velocidad de rebote del elemento percutor (V_r) y la velocidad de impacto del elemento percutor (V_i).

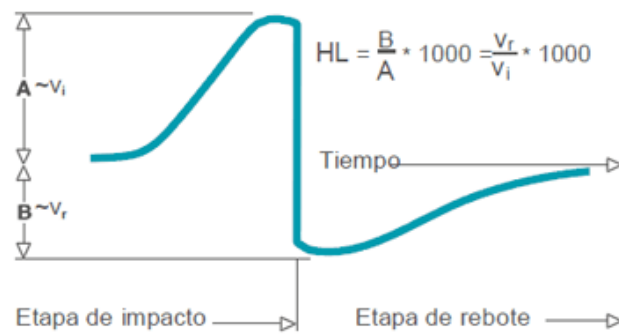


Figura 3-3. Tensión de la señal de salida [50].

En la Figura 3-4 se observa el instrumento utilizado para la realización de este ensayo. El Leeb PCE-2500 permite realizar medidas de una manera ágil y sencilla. Requiere una prueba previa con un material testigo para comprobar su correcto funcionamiento. Se han realizado tres medidas por cada eje de cada muestra.



Figura 3-4. Leeb PCE-2500.

3.2.2 Caracterización de los morteros de cemento

Mediante la implementación de diversos ensayos estandarizados, se busca identificar las características fundamentales de los morteros que ejercerán un impacto directo en su comportamiento y durabilidad. A continuación, se verán los diferentes ensayos de caracterización por orden de realización:

3.2.2.1 Ultrasonidos y anisotropía

El enfoque mediante ultrasonidos constituye una técnica valiosa en la evaluación de materiales, aprovechando ondas ultrasónicas de frecuencia definida para explorar la estructura interna de diversos materiales en sus diferentes estados. Este método, clasificado como ensayo no destructivo (END), revela información crucial sobre la integridad y la calidad del material bajo análisis. Al observar la trayectoria de las ondas ultrasónicas a lo largo del tiempo, es posible identificar y caracterizar las discontinuidades presentes en el objeto o material examinado, brindando así una comprensión detallada de su composición interna y sus posibles defectos [51] [52].

Este método se destaca por su capacidad para penetrar en la sustancia sin comprometer su integridad, lo que lo convierte en una herramienta valiosa en una variedad de aplicaciones, desde la inspección de

estructuras de ingeniería hasta la evaluación de materiales compuestos en la industria aeroespacial. La interpretación de las señales ultrasónicas reflejadas proporciona información vital sobre la homogeneidad del material, la presencia de grietas, inclusiones u otras imperfecciones que podrían afectar su rendimiento o durabilidad en el tiempo [53]. La norma utilizada ha sido la UNE-EN 14579:2005: “Métodos de ensayo para piedra natural: Determinación de la velocidad de propagación del sonido” [54]. La frecuencia utilizada durante este ensayo ha sido de 1MHz.

En este ensayo se realizarán medidas de ultrasonidos en todas las muestras cúbicas de las que se dispone y en los tres ejes de coordenadas de cada una de estas. También se realizó una medición de la distancia de cada eje, de esta manera se obtendrán las velocidades.

La anisotropía en los materiales refiere a su capacidad para variar sus propiedades según la dirección en la que se analicen. Esta característica puede influir en diversas cualidades, desde la elasticidad mecánica hasta la conductividad térmica, dependiendo de cómo se evalúen. Esta particularidad está estrechamente ligada a la heterogeneidad de los materiales, lo que tiene un impacto significativo en pruebas como las relacionadas con la porosidad capilar y otros ensayos similares. La fórmula utilizada será la que aparece en la Figura 3-5.

$$dM\% = \left(1 - \left(\frac{2V_{Pmin}}{V_{Pmax} + V_{Pmedia}} \right) \right) \times 100$$

Figura 3-5. Índice de anisotropía total.

En la Figura 3-5 se puede observar que el índice de anisotropía total se calcula utilizando la velocidad de propagación máxima, mínima y media.



Figura 3-6. Imagen tomada durante la realización del ensayo de ultrasonidos.

3.2.2.2 Porosidad accesible al agua

El siguiente ensayo que se ha llevado a cabo se centra en la porosidad accesible al agua. Según el ensayo de la norma UNE-EN 1936:2007: “Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total”. Con este método se pretende obtener información sobre el volumen de poros con un tamaño superior a $0,1\mu\text{m}$, conectados entre sí y con el exterior. Este parámetro muestra que, a mayor porosidad accesible, mayor será la posibilidad por parte de los agentes externos de introducirse en el interior del material y alterarlo. Para este ensayo se han empleado 3 muestras con forma cúbica por cada tipo de mortero y fueron secadas en la estufa a $(70\pm 5)^\circ\text{C}$ hasta que la masa (M_d) fuera constante. Los seguidos han sido los siguientes:

1. Se pesan las muestras de forma cúbica (m_d).
2. Se introducen las muestras en la campana (que se encuentra conectada a la bomba) y se comienza a extraer el aire

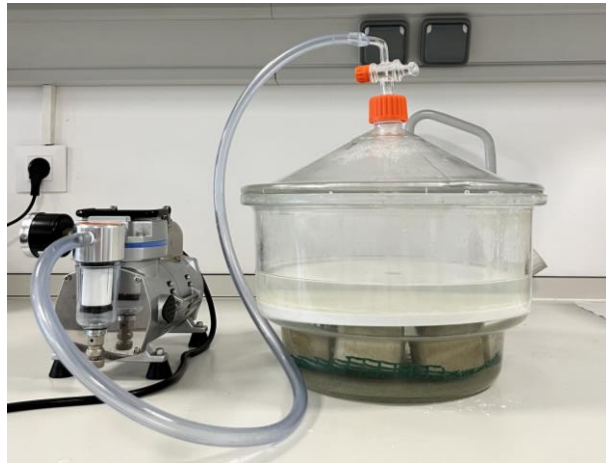


Figura 3-7. Campana de vacío conectada a un compresor.

3. Tras cuatro horas extrayendo el aire se obtiene el peso saturado (m_s)
4. Después de hallar el peso saturado se le pasa un tramo húmedo para limpiar la superficie.
5. Por último, se pesan las muestras bajo el agua; de esta manera se halla el peso hidrostático (m_h)



Figura 3-8. Balanza colocada para la medición del peso hidrostático.

Para calcular la porosidad abierta ρ_o (%), se utiliza la siguiente ecuación

$$\rho_o = \frac{m_s - m_d}{m_s - m_h} \times 100$$

Donde, m_s es el peso de la probeta saturada, m_d es el peso de la probeta seca y m_h es la masa de la probeta sumergida.

3.2.2.3 Porosidad capilar

El ensayo UNE-EN 1925:1999 evalúa el coeficiente de absorción de agua por capilaridad en piedra natural. Es esencial para comprender cómo reacciona el material ante la humedad y las condiciones climáticas, ofreciendo información sobre su porosidad y permeabilidad [55]. El objetivo principal es

confirmar que la presencia de poros en un material, especialmente aquellos utilizados en construcción, es un factor determinante al examinar la capacidad de absorción ascendente del agua. Este fenómeno se observa comúnmente en estructuras como los cimientos o las fachadas de los edificios.

La capilaridad se refiere al cambio de volumen de líquido que ocurre en los poros de un material cuando está ligeramente sumergido. Otra característica relevante que incide en este proceso es el tamaño de los poros, ya que la capilaridad se manifiesta especialmente en aquellos que tienen entre $0.1\ \mu\text{m}$ y $100\ \mu\text{m}$ de diámetro. Esta dinámica de absorción y distribución de líquidos en los poros puede tener analogías con otros fenómenos naturales y por lo que es de vital importancia comprender la estructura porosa de los materiales de construcción [56].

Se establece que cuanto mayor sea el volumen de poros con un diámetro más pequeño, mayor será la fuerza de succión dentro del material. Esto se traduce en una altura de frente capilar más elevada.

El ensayo consiste en sumergir diversas probetas con distintos porcentajes de material de cambio de fase en una bandeja con una fina capa de agua. Esta capa debe cubrir aproximadamente 3 mm de cada muestra. Luego, se midió la absorción en intervalos de tiempo específicos para obtener las curvas de capilaridad que se presentarán en los resultados, considerando la velocidad de absorción.

Para este ensayo se han utilizado tres muestras de cada tipo.

El ensayo se ha realizado conforme a las directrices establecidas por la norma UNE EN 1015-18:2003; se han seguido los siguientes pasos:

1. Preparación de la superficie de la muestra mediante limado.
2. Secado de las muestras en una estufa a 75°C hasta alcanzar un peso constante.
3. Vertido de una capa de agua sobre la bandeja.
4. Colocación de las muestras sobre la bandeja y ajuste del nivel de agua para cubrir aproximadamente 3 mm de su parte inferior.
5. Comienzo de un temporizador y registro del peso de cada muestra en los intervalos de tiempo especificados por la norma, utilizando una balanza de precisión.
6. Colocación instantánea de la muestra de vuelta en la bandeja y repetición del proceso desde el paso anterior.



Figura 3-9. Muestras sometidas al ensayo de capilaridad

3.2.3 Análisis termográfico

En este ensayo, se centrará en la evaluación de la capacidad de diversos morteros, cada uno compuesto con distintas proporciones de materiales de cambio de fase, para retener y liberar calor en diversos entornos. Además, se medirá la radiación infrarroja emitida por estas muestras. Específicamente, se verán dos configuraciones: la exposición al calor seguido de un enfriamiento, y la exposición al frío seguido de un calentamiento.

Un factor crítico para la emisión de radiación por parte de un objeto es que supere el punto de cero absoluto (0°K). El propósito de estas pruebas, en términos metodológicos, es analizar las variaciones en las características de las muestras en función de diferentes condiciones ambientales [57].



Figura 3-10. Cámara FLIR i7.

En la Figura 3-10 se puede observar la cámara térmica utilizada para realizar el análisis termográfico. Se trata del modelo FLIR i7. Con esta, se han realizado mediciones de temperatura en las muestras. Además, se han tomado imágenes durante los periodos de enfriamiento y calentamiento para observar como el distinto porcentaje y el tipo de PCM de cada probeta afecta al almacenamiento de energía en forma de calor.

Para este ensayo se han utilizado seis probetas de forma cilíndrica, cada una con un porcentaje o tipo de material PCM diferente. Durante el experimento se extraen datos de cada probeta y se toman varias imágenes para observar de forma visual el almacenamiento de energía térmica.

Anteriormente se ha mencionado que en este análisis se han realizado dos ensayos. A continuación, se examinarán los pasos seguidos en cada uno de ellos.

- *Ensayo de enfriamiento*

1. Las probetas se colocan en la estufa hasta alcanzar una temperatura de 60°C .
2. Se llena parcialmente un recipiente con agua, enfriada previamente a 12°C .
3. Las muestras se ubican sobre una rejilla dentro del recipiente para absorber el agua fría.
4. Se registra la temperatura de cada muestra y su evolución utilizando la cámara en intervalos de 15 minutos.
5. Se lleva a cabo el análisis de los resultados obtenidos.

- *Ensayo de calentamiento*

1. Las probetas se introducen en el frigorífico hasta alcanzar una temperatura de -17°C .
2. Se prepara parcialmente un recipiente con agua, previamente calentada a 35°C .

3. Las muestras se colocan sobre una rejilla en el recipiente para absorber el agua caliente.
4. Se registra la temperatura de cada muestra y su evolución utilizando la cámara en intervalos de 10 minutos.
5. Se procede al análisis de los resultados obtenidos.

3.2.4 Ensayos de durabilidad

A continuación, se procederá con los ensayos de durabilidad, que incluirán la prueba de resistencia al hielo y la prueba de alteración por sales

Los ensayos han sido diseñados para explorar la resistencia de los morteros frente a condiciones externas variables, tales como la exposición a sales y los ciclos de congelación y descongelación. Cada uno de estos aspectos ha sido medido y analizado durante este ensayo, implicando un monitoreo preciso de la pérdida de masa en cada muestra a lo largo de los ciclos (2 o 5 ciclos dependiendo del ensayo a realizar). Posteriormente, las probetas han sido sometidas a un proceso de secado en una estufa ventilada a 75°C durante un mínimo de 24 horas, con el objetivo de obtener el peso seco requerido para la evaluación. Además, se ha llevado a cabo un seguimiento visual de la estructura externa de cada probeta mediante fotografías, permitiendo así un análisis detallado de su evolución durante el transcurso de los ciclos de ensayo. De esta manera se podrá observar visualmente el efecto de estos ensayos sobre las muestras utilizadas

3.2.4.1 Hielo-deshielo

Para este ensayo, se aplicó una adaptación de la norma UNE-EN 12371:2011, titulada "Métodos de ensayo para piedra natural: Determinación de la resistencia a la heladicidad" [58]. Para este ensayo se ha utilizado una muestra en forma de vaso de cada tipo (se recuerda que existen siete tipos diferentes de muestras). En este procedimiento experimental, se busca evaluar la capacidad de las muestras para resistir los ciclos repetidos de congelación y descongelación. Durante estos ciclos, se registran las variaciones de peso de las muestras para examinar cualquier pérdida de material. Las mediciones de masa tendrán lugar tras la finalización de dos ciclos completos de hielo deshielo. Estos cambios en la masa de las muestras se deben principalmente a las fluctuaciones extremas de temperatura a las que son sometidas. Las muestras pasan de estar sumergidas en agua a adoptar un estado completamente sólido cuando se introducen en el congelador, donde el agua que han absorbido debido a su porosidad se transforma en hielo.

A continuación, se expondrán los pasos seguidos para la realización de este ensayo.

1. Se introduce cada muestra en el desecador, lleno de agua para cubrirlas por completo. El desecador se cierra y se conecta a una bomba de vacío.
2. Se enciende la bomba y se abre la llave de paso para crear vacío en el desecador. Se comprueba que el manómetro registre un incremento gradual hasta alcanzar 80 KPa.
3. Se mantiene la saturación durante 2 horas (Figura 3-11).
4. Las muestras se sacan del desecador y se colocan en el congelador a -27°C durante 8 horas.
5. Posteriormente, se sumergen en agua a temperatura ambiente durante 4 horas para descongelarlas. Este proceso se repite para asegurar la uniformidad de los resultados.



Figura 3-11. Muestras sometidas a saturación en el desecador.

Como se ha mencionado con anterioridad, las mediciones se realizarán cada dos ciclos. Por lo tanto, cada dos ciclos se introducen las muestras en la estufa a 75° C con el objetivo de eliminar el agua del interior de las muestras. Después del secado de las muestras se pesarán en la balanza de precisión.

3.2.4.2 Alteración por sales

Se ha llevado a cabo un análisis exhaustivo de la resistencia física y química de los morteros frente a diversas sales, como parte de este estudio. Estas sales, de naturaleza soluble y diversa composición, son incorporadas a los morteros y absorbidas por ellos en los recipientes correspondientes. Posteriormente, penetran en los poros de los morteros y cristalizan en su interior. Este proceso induce cambios en la masa de las muestras, los cuales son observados a lo largo de cada ciclo de absorción. Se han utilizado tres disoluciones diferentes y en cada una se han introducido dos tipos de cada muestra.

Las disoluciones utilizadas han sido las siguientes.

- ➤ Sulfato de sodio (Na_2SO_4) al 14% en peso.
- ➤ Cloruro de sodio (NaCl) al 20% en peso.
- ➤ Agua de mar filtrada previamente.

El procedimiento seguido para la alteración por sales ha sido el siguiente.

1. Se introduce cada muestra en el recipiente donde se encuentra la disolución correspondiente; la muestra debe estar totalmente cubierta por la disolución
2. Las muestras estarán sumergidas durante 2 horas (ver Figura 3-12).
3. Se introducen las muestras en la estufa a 40 °C durante 4 horas.
4. Después de la estufa pasan a un recipiente cerrado donde se encuentra una disolución saturada de KCl (para mantener un 84% de humedad) donde estarán durante un periodo de 18 horas (ver Figura 3-13).

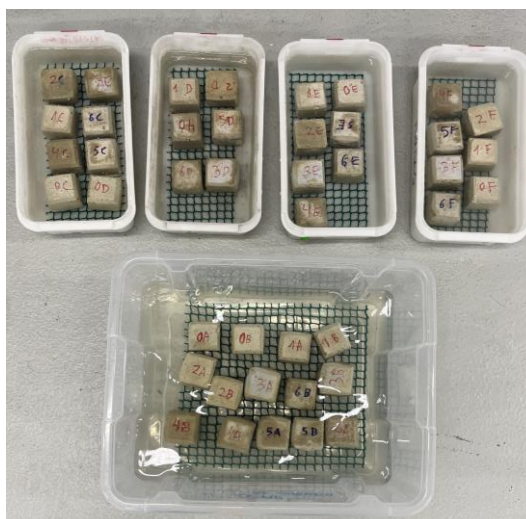


Figura 3-12. Muestras sumergidas en las disoluciones.



Figura 3-13. Muestras dentro del recipiente en el que se encuentra el KCl.

En este estudio, tras describir el procedimiento, se llevará a cabo una medida del peso de las muestras en una balanza de precisión cada quinto ciclo, con el fin de monitorear cualquier variación en su masa. Para lograrlo, es esencial eliminar cualquier residuo de disolución que pueda haber quedado tanto dentro como fuera de las muestras. Estas serán sometidas a un proceso de desalinización mediante inmersión en agua durante 24 horas. Posteriormente, se realizará una limpieza externa con el mismo tipo de agua y se colocarán en una estufa a 75°C para asegurar la evaporación adecuada del agua absorbida. Después de un periodo de secado de 48 horas, se procederá a pesar cada una de las muestras.

3.2.4.3 Choque térmico

En este ensayo se busca evaluar la variación de masa que experimentan distintas muestras frente a cambios abruptos de temperatura. A diferencia de procesos con temperaturas muy bajas, aquí se examina cómo se comportan y qué sensibilidad tienen las muestras al pasar de elevadas temperaturas a temperaturas significativamente más bajas al ser sumergidas en agua a temperatura ambiente (20 ± 5 °C).

Para llevar a cabo este análisis, se empleó una muestra cilíndrica por cada tipo de mortero. El objetivo principal radica en analizar todas las muestras y su reacción ante las mismas pruebas, considerando sus diversas composiciones en material de cambio de fase. Además, se busca determinar

si los cambios de fase del Material de Cambio de Fase (PCM), de estado sólido a líquido, podrían generar tensiones internas contra las paredes de los poros de los morteros, lo que eventualmente podría conducir a su ruptura. Este proceso se llevó a cabo siguiendo las directrices establecidas en la norma UNE-EN 14066:2014, titulada "Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia al envejecimiento por choque térmico"[59].

El procedimiento seguido para el choque térmico ha sido el siguiente.

1. Introducir todas las muestras en la estufa a una temperatura de 100 °C durante 8 horas (ver Figura 3-14)
2. Sumergirlas en un recipiente con agua a temperatura ambiente de (20 ± 5) °C durante un intervalo de tiempo de 4 horas
3. Repetir el proceso

En línea con el ensayo de hielo-deshielo, cada dos ciclos requieren que todas las probetas sean sometidas a una temperatura de 75°C en una estufa durante un período de 24 horas. Posteriormente, se procede a medir su peso en una balanza de precisión de la manera óptima posible, una vez que el agua interior se ha evaporado por completo. Este procedimiento garantiza una evaluación precisa de las muestras y permite determinar cualquier variación en su masa después de cada ciclo de temperatura.



Figura 3-14. Muestras en la estufa a 100 °C.

3.2.5 Análisis termogravimétrico y calorimetría de barrido diferencial

El análisis termogravimétrico (TGA) y la calorimetría de barrido diferencial (DSC) son técnicas analíticas utilizadas para estudiar cómo varía la masa de una muestra bajo condiciones de temperatura controladas. Estos métodos son especialmente útiles para medir y estudiar las reacciones de descomposición primarias que ocurren en materiales sólidos y líquidos. El TGA mide la masa de una muestra mientras se somete a un programa de temperatura, mientras que el DSC detecta y cuantifica cambios en el flujo de calor asociados con transiciones de fase. Estas técnicas son fundamentales para comprender las propiedades térmicas de materiales y sistemas en diversos campos científicos y de ingeniería [60].

El objetivo principal es medir y analizar la variación de temperatura, masa y flujo de calor de la muestra. Para este propósito, se emplea el equipo Labsys Evo 1180, que incluye una balanza y un horno capaz de alcanzar temperaturas de hasta 1180°C.

En la primera fase del análisis, se programa el equipo con diferentes secuencias de temperatura para la muestra de mortero. Esto incluye la definición de velocidades de calentamiento y enfriamiento, así como la configuración de la refrigeración y los gases de arrastre correspondientes. La programación

detallada de las etapas de temperatura garantiza una experiencia completa de análisis, incluyendo la especificación de la temperatura mínima, máxima y la velocidad de incremento de grados en relación con el tiempo. Todo este proceso se lleva a cabo mediante el programa "Acquisition".

Posteriormente, se utiliza el software "Processing" para procesar y evaluar los resultados obtenidos durante el análisis. Este software permite extraer las conclusiones necesarias a partir de los datos recopilados, facilitando la interpretación de los resultados y la toma de decisiones.



Figura 3-15. Equipo Labsys Evo 1180 [61].

Para garantizar una extracción lo más representativa posible de cada muestra, se procedió a dividir por la mitad cada una de las muestras utilizadas. De esta manera, se pudo extraer la muestra a analizar del centro de cada mortero de manera uniforme y homogénea.

Continuando con la metodología, se raspó cuidadosamente el centro de cada mortero para obtener los polvos correspondientes. Estos polvos fueron sometidos a un proceso de tamizado con el objetivo de obtener partículas de tamaño similar para cada muestra. Este paso permitió asegurar que las muestras analizadas fueran comparables y que cualquier variación en los resultados estuviera relacionada con las propiedades intrínsecas de los materiales y no con diferencias en el tamaño de las partículas.

Para el análisis de la variación de temperaturas, se establecieron rangos que abarcan las temperaturas de fusión de los materiales de cambio de fase (PCM) utilizados. Específicamente, se fijaron temperaturas pico de 15°C para estar por debajo de la temperatura del PCM RT18, y de 50°C para superar la temperatura del PCM RT35. Cada muestra se sometió a un ensayo con diferentes porcentajes y combinaciones de PCM. Cada ensayo consistió en tres ciclos en los cuales se varió la temperatura entre 15°C y 50°C. Estos ciclos se repitieron tres veces, con un intervalo de 5 minutos a 15°C entre cada ciclo. Se decidió descartar el primer ciclo para la interpretación de los resultados, con el fin de considerar mediciones más estables y representativas una vez que la muestra se hubiera estabilizado.

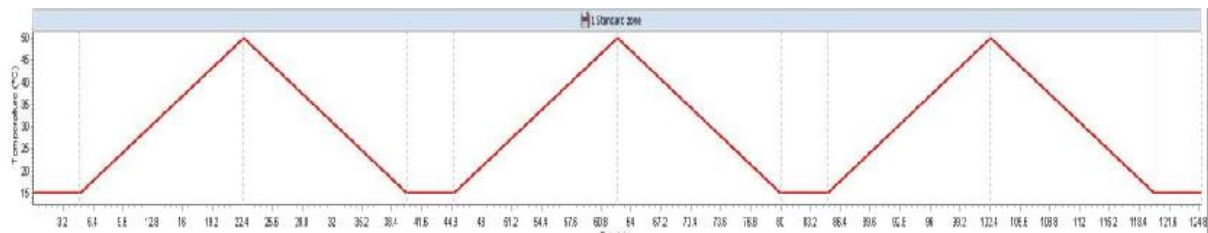


Figura 3-16. Ciclos de variación de temperatura.

Los ciclos descritos se pueden visualizar en la Figura 3-16. Este procedimiento permitió evaluar cómo reaccionaban las muestras a los cambios de temperatura y proporcionó información importante sobre sus propiedades térmicas y comportamiento frente a los PCM utilizados.

Posteriormente se lleva a cabo el ensayo de pérdida de peso de cada muestra, el cual difiere del anterior en cuanto a la temperatura y duración del proceso. En este ensayo, la muestra se expone a temperaturas mucho más elevadas durante un período prolongado. La temperatura máxima alcanzada es de 900°C. Este procedimiento permite evaluar la estabilidad térmica de las muestras y determinar su capacidad para soportar condiciones extremas de temperatura sin sufrir alteraciones significativas en su composición o estructura. Los resultados obtenidos de este ensayo complementan la información recopilada durante el análisis de variación de temperaturas, proporcionando una visión más completa del comportamiento de las muestras ante condiciones térmicas adversas.

La programación de estos ciclos se lleva a cabo mediante el programa "Acquisition", el cual permite establecer los parámetros de cada ciclo de manera precisa. Estos parámetros incluyen:

- Temperatura mínima
- Temperatura máxima
- Rampa de temperatura (expresada en °C por minuto)
- Tiempos específicos para cada ciclo
- Tipo de gas utilizado para proteger la muestra durante el proceso

La configuración detallada de estos parámetros garantiza la ejecución controlada y reproducible de los ensayos, lo que resulta fundamental para obtener resultados confiables y comparables. El programa "Acquisition" ofrece una interfaz intuitiva que facilita la programación y supervisión de los ciclos de temperatura, permitiendo ajustes según los requisitos específicos de cada experimento.

#		Initial T (°C)	Final T (°C)	S.r. (K/min)	Time (s)	Valves												TG Tare																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
1		15	15	0	300																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								

Figura 3-17. Programación ciclos variación de temperatura.

#		Initial T (°C)	Final T (°C)	S.r. (K/min)	Time (s)	Valves	TG Tare
1	→	30	30	0	300		☒
2	→	30	900	3	17400		☒
3	→	900	900	0	300		☒
4	→	900	30	10	5220		☒

Figura 3-18. Programación ciclo pérdida de peso.

Por último, una vez que el ensayo está programado, es necesario especificar el tipo de prueba que se llevará a cabo. Antes de proceder con los ensayos de las muestras, se realiza un ensayo del blanco, que consiste en someter un pocillo vacío a la misma programación de variación de temperaturas utilizada para las muestras. Este, ofrece una referencia base para el análisis, ya que permite evaluar cualquier cambio o variación en las mediciones que no esté directamente relacionado con el contenido de la muestra. Al utilizar el blanco como referencia, se pueden identificar y corregir posibles interferencias o errores sistemáticos que podrían afectar la precisión de los resultados.

Una vez realizado el ensayo del blanco, se utiliza como referencia al llevar a cabo los ensayos de cada una de las muestras. Esto asegura que el análisis se realice con la máxima precisión, centrándose únicamente en el contenido del pocillo y permitiendo una interpretación precisa de los resultados obtenidos.

Otros parámetros importantes que se deben especificar incluyen el peso del pocillo con la muestra, el tipo de prueba que se llevará a cabo, así como el tipo de pocillo y gas utilizado durante el ensayo. Una vez ingresados todos estos datos, se introduce el pocillo con la muestra, que suele ser de aproximadamente 300 mg para la prueba de variación de temperaturas, y de alrededor de 450 mg para la prueba de pérdida de peso. Se debe realizar la activación del flujo de agua para la refrigeración y se abrirá la válvula de nitrógeno para proteger la muestra durante el ensayo. Finalmente, se cierra el equipo y se inicia el ensayo. Es importante destacar que para la prueba de variación de temperaturas se utiliza el pocillo pequeño, mientras que para la prueba de pérdida de peso se utiliza el pocillo grande. Estos procedimientos garantizan condiciones controladas y reproducibles durante el análisis, lo que es crucial para obtener resultados precisos y confiables.

Selected Experiment

Apparatus **Labsys Evo 1150 - TG-DSC 1200°C**

Experiment Properties

Name
Blank
Macro

Mass mg
Molar Mass g/mol
Crucible

Comment

Procedure

Procedure Summary

Procedure Properties

General

Experiment Group
End Mode
Temperature
Carrier Gas 1
Carrier Gas 2

Measure Range
TG Range

Figura 3-19. Configuración de parámetros.

4 RESULTADOS

En el presente apartado se presentan los resultados obtenidos en los diferentes ensayos realizados sobre las muestras de mortero con PCM.

4.1 Dureza superficial al impacto (HLD).

En este ensayo se ha utilizado la metodología explicada en el apartado anterior de este documento. Se ha procedido a la medida de las ocho muestras de cada uno de los siete tipos existentes. Con estas medidas se ha realizado una media para hallar la dureza superficial media de cada tipo de muestra. Se han tomado cinco medidas de cada muestra. En total se han realizado doscientas ochenta medidas. En la tabla que se observa a continuación se puede ver el resultado final de dureza después de aplicar dos medias. Una para las tres medidas realizadas en cada cubo y otra para las medidas del mismo tipo.

Muestra	Dureza superficial al impacto (HLD).
M0	483,75±7,44
M1	402,29±6,97
M2	395,71±11
M3	500,17±5,11
M4	493,29±6,15
M5	468,25±18,87
M6	400,00±14,81

Tabla 4-1. Dureza superficial de cada tipo de muestra.

Como se puede observar en la Tabla 4-1 la muestra que presenta mayor dureza es la M3 que contiene un 10 % de RT18 seguida de M4 que contiene un 20 % de RT18. Por lo tanto, se puede determinar que el PCM de tipo RT18 en bajas cantidades mejora la dureza superficial.

4.2 Caracterización morteros de cemento

4.2.1 Análisis de ultrasonidos.

A continuación, en la Tabla 4-2. Velocidad de ultrasonidos en cada eje. se presenta el cálculo de la velocidad de cada eje en cada tipo de muestra. Para obtener este resultado previamente se ha realizado

una media aritmética del tiempo que tardan los ultrasonidos en atravesar cada eje de las ocho réplicas de cada tipo. Obteniendo este tiempo y con la distancia que tienen que recorrer las ondas en cada eje se hallará la velocidad.

Muestra	Vx (m/s)	Vy (m/s)	Vz (m/s)
M0	2360,98±50,58	2256,56±34,64	2315,14±50,50
M1	2297,00±60,85	2210,34±34,09	2299,38±39,35
M2	2302,19±113,51	2189,95±79,53	2202,26±68,35
M3	2206,02±53,25	2187,87±29,59	2192,86±108,74
M4	2236,84±52,96	2175,40±61,17	2168,57±58,93
M5	2163,78±21,92	2192,55±19,14	2123,72±33,73
M6	2164,97±60,77	2148,41±41,16	2145,59±28,22

Tabla 4-2. Velocidad de ultrasonidos en cada eje.

Mediante el análisis de las velocidades de propagación de ultrasonido es posible identificar patrones que sugieren una relación entre la velocidad de propagación de las ondas y la porosidad de los morteros. La velocidad de ultrasonidos puede ser un indicador útil de la densidad y la uniformidad del material. Cuando un material presenta una mayor velocidad de ultrasonidos, generalmente indica una menor porosidad. Esto se debe a que la velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas está influenciada por la densidad y la homogeneidad del material.

En el ámbito de nuestra investigación se puede observar que las muestras que presentan una menor velocidad son la M5 (que contenía 5% de RT18 Y 5% RT35) y M6 (que contenía 10% RT18 y 10% RT35), por lo tanto, según el análisis de ultrasonidos son los que presentan una mayor porosidad. Por otro lado, M1 es la muestra que contiene PCM que presenta las velocidades más elevadas los que nos indica (según ultrasonidos) que tendrá menor porosidad.

4.2.2 Porosidad accesible al agua

En este apartado se mostrarán los resultados correspondientes a la porosidad accesible al agua. Para ello se han obtenido valores de tres muestras de cada tipo. Los valores medidos han sido el peso en seco, el peso saturado y el peso hidrostático. Los valores mencionados se utilizan para calcular la porosidad accesible al agua, mediante la siguiente fórmula:

$$\rho_o = \frac{m_s - m_d}{m_s - m_h} \times 100$$

En la Tabla 4-3 figuran los s obtenidos en cada uno de los siete tipos de muestras para los tres pesos mencionados con anterioridad (en seco, hidrostático y saturado).

	M0	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Peso seco (g)	213,67	181,00	194,00	232,00	207,17	215,83	187,00
Peso saturado (g)	243,73	210,04	231,81	269,23	240,87	257,13	219,73
Peso hidrostático (g)	127,71	103,77	110,72	139,45	123,73	130,93	107,70

Tabla 4-3. Valores de peso seco, peso saturado y peso hidrostático.

Con estos datos de los diferentes pesos, se calculará la porosidad accesible al agua en cada una de las muestras. Una vez expuestos estos valores de porosidad (Tabla 4-4), se analizarán los resultados obtenidos.

	M0	M1	M2	M3	M4	M5	M6
ρ_o (%)	25,91	27,31	31,21	28,66	28,77	32,72	29,22

Tabla 4-4. Porosidad de los diferentes tipos de morteros de cemento.

A la vista de los resultados obtenidos se puede determinar que las muestras que presentan una mayor porosidad son la M5 (5 % de RT18 y 5 % de RT35) y la M2 (20 % de RT35). Por otro lado, la menor porosidad corresponde a M0 que es la que no contiene PCM de ningún tipo. Centrándonos en las que contienen PCM las de menor porosidad son la M1 (10 % de RT35) y la M3 (10 % de RT18). Por lo tanto, estas últimas al tener menor porosidad dificultan en mayor medida la entrada de agua y otros agentes externos a su interior; aumentando así su resistencia y durabilidad a lo largo del tiempo.

4.2.3 Porosidad capilar

En este ensayo como se mencionó con anterioridad se han utilizado tres cubos de cada muestra y se han sometido a un ensayo de capilaridad. Primero se representará gráficamente (después de realizar una media entre los tres cubos de cada tipo) la ganancia de peso de cada tipo de muestra a lo largo del tiempo. Esta representación se observa en la Figura 4-1.

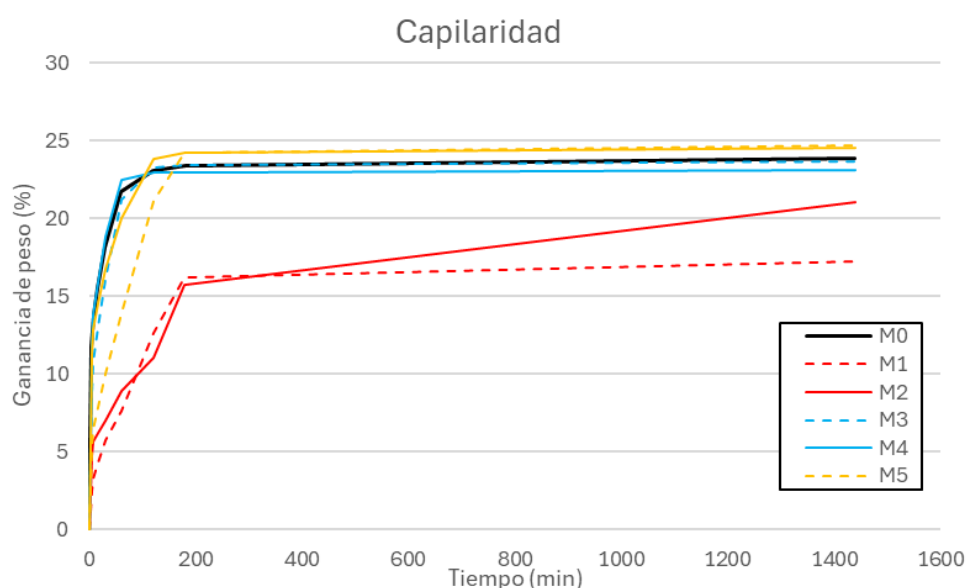


Figura 4-1. Capilaridad de los morteros de cemento.

Como se puede observar las primeras muestras que alcanzan su máximo de absorción por capilaridad en primer lugar serían la M0, M4 y M3 que tienen unas curvas muy similares entre sí. Las muestras que más rápido absorben en la primera fase son las anteriormente mencionadas y la M6. En todas las curvas se pueden observar tres frases. La primera fase es la de absorción inicial donde el líquido es absorbido rápidamente por los poros del material debido a la acción capilar. Las moléculas de líquido se adhieren a las paredes de los poros del material poroso y son atraídas hacia el interior por fuerzas de cohesión y adhesión. En la segunda fase se observa un aumento gradual donde la ganancia de peso del material poroso aumenta gradualmente a medida que más líquido es absorbido por capilaridad. La tercera y última fase es la de estabilización, la ganancia de peso del material poroso alcanza un punto de estabilización o

equilibrio, donde la tasa de absorción de líquido por capilaridad se iguala a la tasa de evaporación o pérdida de líquido.

A continuación, en la Tabla 4-5 se pueden observar parte de los datos numéricos con los que se ha construido la gráfica de la Figura 4-1.

	M0	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Peso inicial (g)	205,42	186,52	184,24	227,35	212,9	218,15	181,00
Peso final (g)	229,28	203,73	205,27	251,03	235,98	242,87	205,77

Tabla 4-5. Peso inicial y final de los morteros de cemento sometidos al ensayo de capilaridad.

En la Tabla 4-6 se puede observar el porcentaje de agua absorbida por cada uno de los diferentes tipos de morteros de cemento al finalizar el ensayo de capilaridad.

Agua absorbida	M0	M1	M2	M3	M4	M5	M6
(%)	11,62	9,23	11,41	10,42	10,85	11,33	13,55

Tabla 4-6. Porcentaje de agua absorbida por los distintos tipos de morteros al finalizar el ensayo de capilaridad

Atendiendo a la absorción de agua de cada tipo de mortero se puede observar que las muestras con mayor absorción de agua serían la M2 (20 % RT35) y la M6 (10 % RT35 y 10 % RT18). En el caso de la M6 coincide con una de las que más rápido absorbían el agua por capilaridad en la primera fase del ensayo. Por lo tanto, los dos tipos de mortero que peor comportamiento tienen durante este ensayo son los tipos 2 y 6; siendo este último el más desfavorable de todos.

Por último, el mortero en el que se produce la menor absorción de agua durante el ensayo de capilaridad es el M1 (10 % de RT35). En la Figura 4-1 se puede observar que la muestra M1 absorbe el agua de una manera muy lenta y gradual. Atendiendo a estas dos características del mortero de cemento M1 se puede determinar que es el que obtiene el mejor comportamiento durante el ensayo de capilaridad.

4.3 Análisis termográfico

4.3.1 Ensayo de enfriamiento

En este ensayo se calentaban los siete morteros de forma cilíndrica hasta una temperatura de 60 °C después se sumergían 3mm en agua enfriada a 12 °C. En este apartado se mostrarán los resultados de este ensayo con la ayuda de unas imágenes y de una gráfica. Con los datos obtenidos de este ensayo se podrá determinar que tipos de morteros almacenan mejor el calor.

A continuación, se muestran una serie de imágenes obtenidas con la cámara FLIR i7 (Figura 3-10) en momentos cruciales del ensayo. La Figura 4-2 muestra una imagen inicial con una escala manual. En la Figura 4-3 se puede observar una imagen después de transcurrir una hora de ensayo, esta imagen y la siguiente tienen escala automática para poder observar que morteros almacenan mejor el calor. Por último, en la Figura 4-4 se puede observar una imagen de los morteros tras dos horas de ensayo. Los morteros están ordenados de izquierda a derecha.

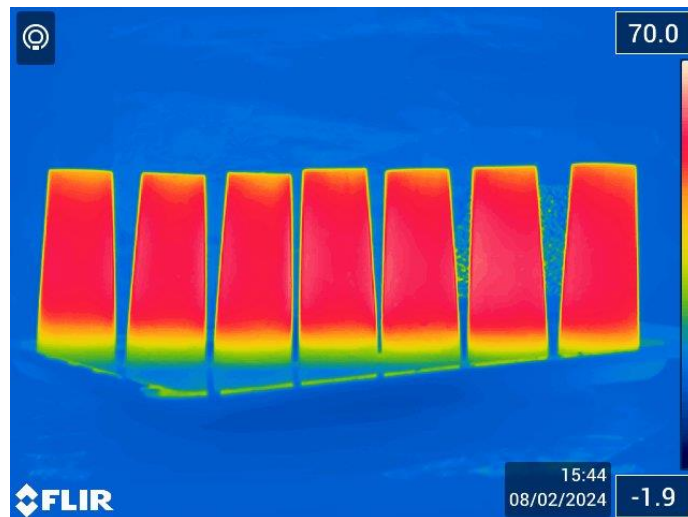


Figura 4-2. Morteros al comienzo del ensayo (escala manual).

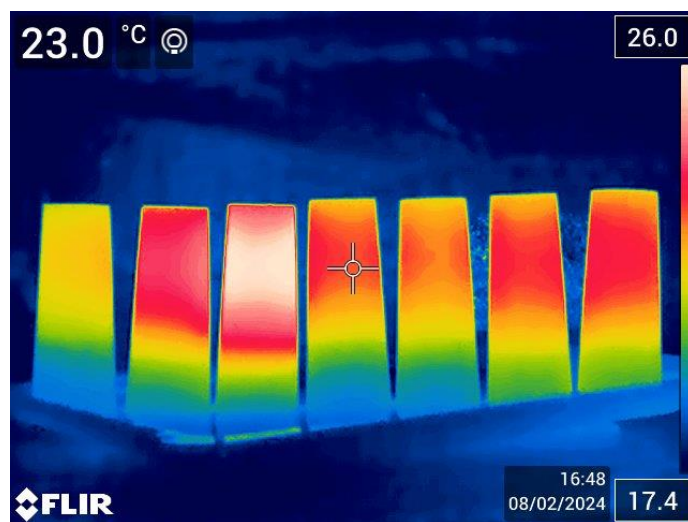


Figura 4-3. Morteros tras una hora de ensayo (escala automática).



Figura 4-4. Morteros tras dos horas (final) de ensayo (escala automática).

A continuación, en la Figura 4-5 y Figura 4-6 y se pueden observar dos gráficas donde están representados todos los valores de temperaturas de cada mortero durante el tiempo en el que ha

transcurrido el ensayo. Se han tenido que separar los valores de temperatura de todos los morteros en dos gráficas para poder ver claramente cada línea; aun así, en la segunda gráfica (Figura 4-6) las temperaturas son muy similares lo que dificulta ligeramente la identificación de cada una. Sin embargo, esto nos supone un problema ya que solo es necesario identificar aquellas muestras que disminuyen su temperatura de manera más lenta y gradual; y que por lo tanto a la finalización del ensayo se encuentran a una temperatura más elevada.

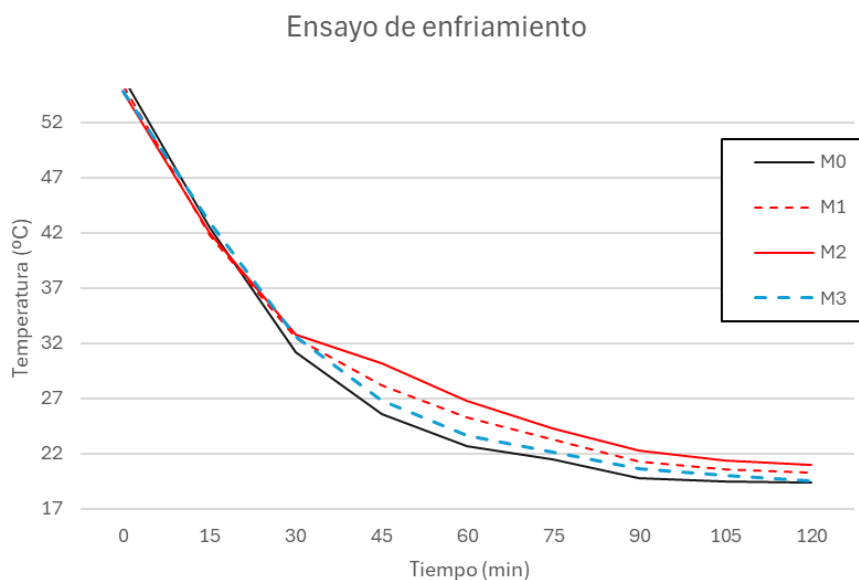


Figura 4-5. Gráfica de enfriamiento M0, M1, M2 y M3

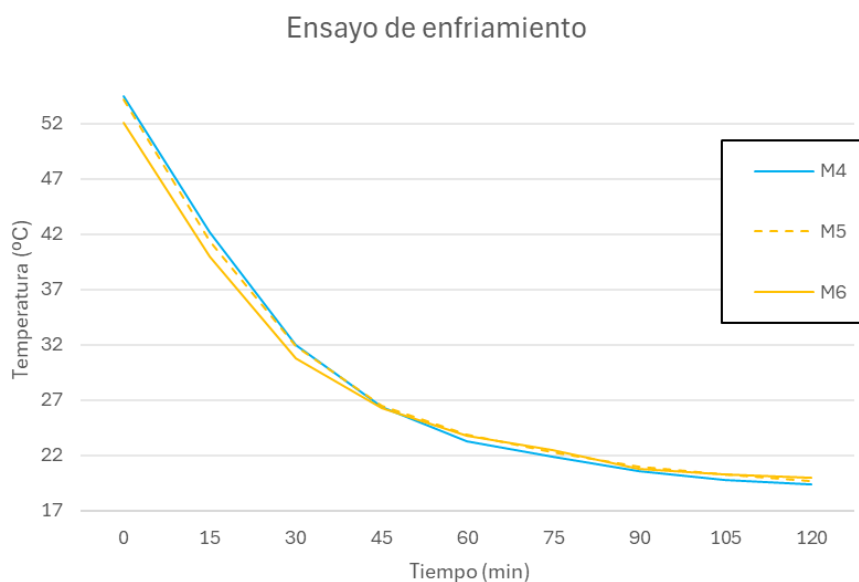


Figura 4-6. Gráfica enfriamiento M4, M5 y M6

Como se puede observar tanto en las imágenes tomadas durante la realización del ensayo como en las gráficas las muestras que mejor se comportan son la M1, M5 M2 y M6. Siendo estas dos últimas las que muestran unos valores más favorables. En las imágenes se puede observar como las muestras M2 y M6 son las que guardan mejor el calor. Así mismo también se observa en las gráficas como estos dos tipos de muestras son los que se enfrían de una manera más lenta y gradual. Por lo tanto, se determina que las muestras M2 y M6 son las que mejor se comportan en este ensayo y por consiguiente las que

guardan mejor el calor. Esto se debe a que el RT35 cuando solidifica a 35 °C cede energía a el mortero por lo que se mantiene el calor.

4.3.2 Ensayo de calentamiento

En este ensayo se introducían los morteros en el congelador a una temperatura de -17 °C. Después se introducían 3 mm en agua a una temperatura de 35 °C. En este apartado se mostrarán los resultados de este ensayo con la ayuda de unas imágenes y de una gráfica. Con los datos obtenidos de este ensayo se podrá determinar que tipos de morteros son más eficientes en la conservación del frío.

A continuación, se muestran una serie de imágenes obtenidas con la cámara FLIR i7 (Figura 3-10) en momentos cruciales del ensayo. La Figura 4-7 muestra una imagen inicial con una escala manual. En la Figura 4-8 se puede observar una imagen después de transcurrir una hora de ensayo, esta imagen y la siguiente tienen escala automática para poder observar que morteros son más eficientes en la conservación del frío. Por último, en la Figura 4-9 se puede observar una imagen de los morteros tras dos horas de ensayo. Los morteros están ordenados de izquierda a derecha.

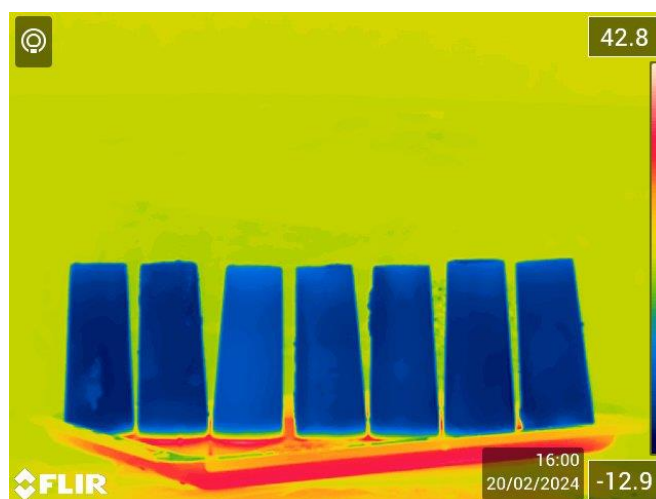


Figura 4-7. Morteros al comienzo del ensayo (escala manual).

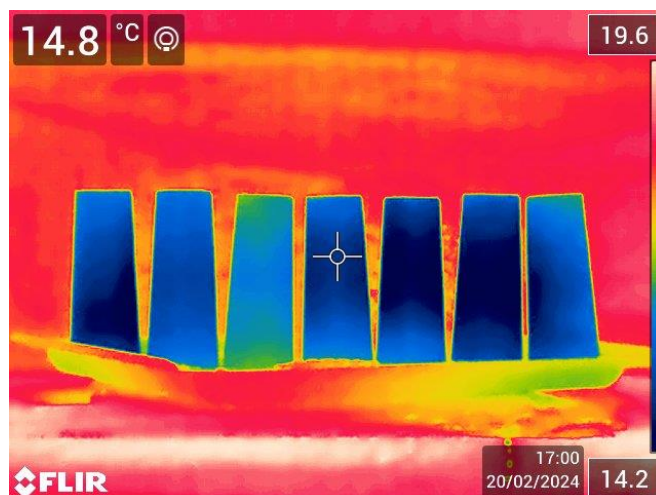


Figura 4-8. Morteros tras una hora de ensayo (escala automática).

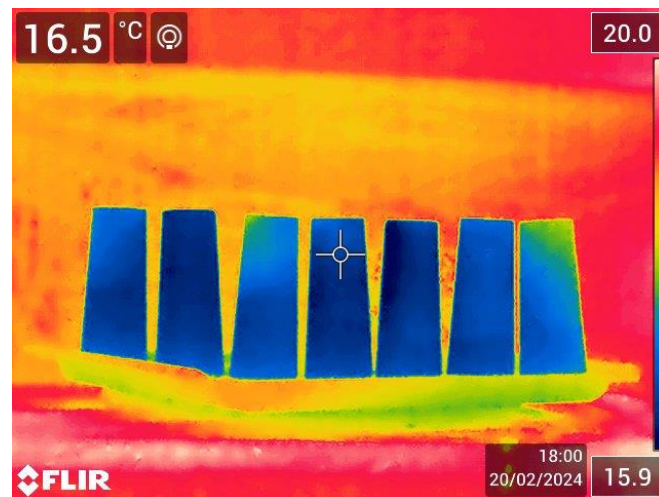


Figura 4-9. Morteros tras dos horas (final) de ensayo (escala automática).

A continuación, en la Figura 4-10 y Figura 4-6 se pueden observar dos gráficas donde están representados todos los valores de temperaturas de cada mortero durante el tiempo en el que ha transcurrido el ensayo. Se han tenido que separar los valores de temperatura de todos los morteros en dos graficas para poder ver claramente cada línea; aun así, no existe mucha separación entre las distintas líneas. Esto no supone un gran problema ya que para la interpretación de estos dos gráficos únicamente sería necesario observar la línea que se va quedando por debajo de las demás; esta corresponderá a las muestras con mayor eficiencia en la conservación del frío.

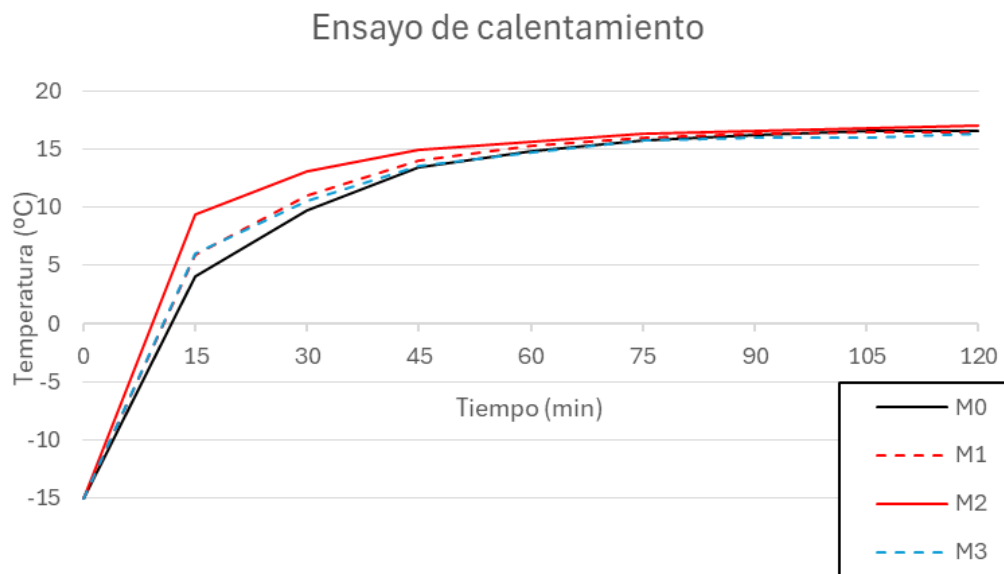


Figura 4-10. Gráfica de calentamiento M0, M1, M2 y M3

En la primera grafica (Figura 4-10) se observa como la línea de color azul correspondiente a la muestra M3 (10 % RT18) es la que se queda por la parte inferior. Por lo tanto, se puede determinar que la muestra M3 es más eficiente a la hora de conservar el frío que las otras muestras que aparecen representadas en la gráfica (M0, M1, M2, y M3).

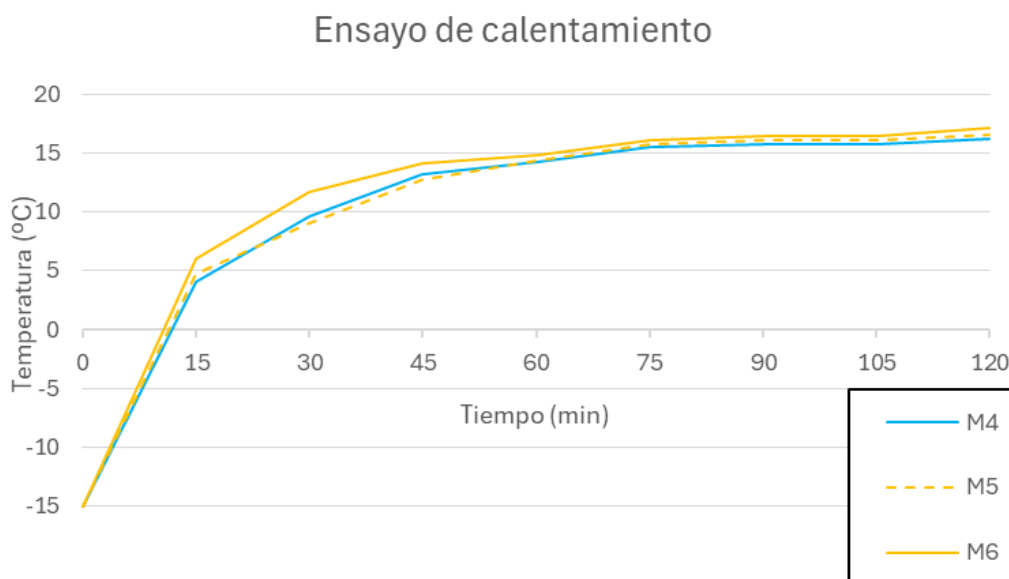


Figura 4-11. Gráfica calentamiento M4, M5 y M6

En la segunda grafica (Figura 4-11) se observa como la línea de color morado correspondiente a la muestra M4 (20 % RT18) es la que se queda por la parte inferior. Por lo tanto, se puede determinar que la muestra M4 es más eficiente a la hora de conservar el frío que las otras muestras que aparecen representadas en la gráfica (M5, y M6).

La imagen tomada con la cámara térmica a la finalización del ensayo de calentamiento (Figura 4-9) corrobora las conclusiones obtenidas de las dos gráficas. Esto se observa en que las muestras M3 y M4 presentan tonos de azul más oscuros respecto al resto de muestras.

Atendiendo a los datos numéricos la temperatura a la finalización del ensayo de M3 es de 16,3 °C mientras que la temperatura de M4 es de 16,2 °C. Por lo tanto, se puede afirmar que la muestra que tiene mayor eficiencia en la conservación del frío es la M4. Por lo tanto, se concluye que M4 (con un contenido del 20 % de RT18) tiene un efecto más pronunciado en la reducción de la transmisión de calor en su interior. Esto se debe a su alta proporción de PCM RT18, el cual tiene la capacidad de almacenar el frío gracias a su temperatura de fusión más baja (18 °C) en comparación con el RT35 (35 °C). Estas propiedades hacen que el PCM RT18 sea altamente eficiente en la conservación del frío, permitiéndole mantener una temperatura constante durante períodos prolongados, incluso ante cambios en la temperatura exterior. Por lo tanto, el mortero M4 demuestra ser una opción destacada para aplicaciones de conservación del frío. El M3 sería la segunda opción a elegir ya que tiene características similares, sin embargo, al tener menos porcentaje de RT18 es ligeramente menos eficiente que la muestra M4. Esto se debe a que el RT18 al fundirse a 18 °C absorbe energía del mortero por lo que le quita calor y se mantiene mejor el frío.

4.4 Ensayos de durabilidad

4.4.1 Hielo-deshielo

En este ensayo las muestras se saturaban, se introducían en el congelador durante 8 horas y después se introducían en agua para descongelarlas. Las mediciones se han realizado cada dos ciclos de hielo-deshielo. La duración completa del ensayo ha sido de 10 ciclos. En este ensayo se busca ver la pérdida de peso y las deformaciones en el mortero que pueden ocasionar las tensiones internas que se provocan al congelarse el agua contenida en el interior de los morteros.

A continuación, se puede observar una gráfica (Figura 4-12) en la que se representa la pérdida de peso en porcentaje que sufren las distintas muestras a lo largo de los ciclos de hielo-deshielo.

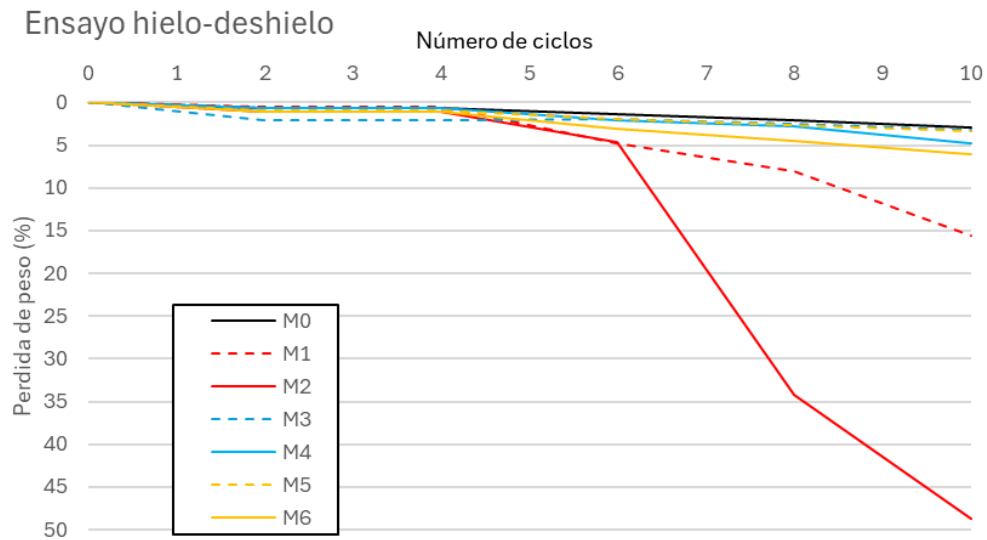


Figura 4-12. Gráfica del ensayo de hielo-deshielo.

En la Figura 4-12 se ve que todas las curvas son similares excepto dos de ellas; estas son las curvas correspondientes a las muestras M1 y M2. Estos dos tipos de morteros son los que contienen PCM del tipo RT35. La muestra M1 contiene un 10 % de RT35 mientras que la muestra M2 contiene un 20 % de RT35. Por lo tanto, conociendo estos datos y observando la gráfica se puede determinar que las muestras que contienen PCM de tipo RT35 son las que peor se comportan en este ensayo (M2 es la que peor se comporta ya que tiene un porcentaje más elevado de RT35). Por último, cabe mencionar que la muestra que menos variación de peso sufre es la M0 que no contiene ningún tipo de PCM; por consiguiente, se puede determinar que el PCM en las muestras durante el ensayo de hielo-deshielo produce mayores pérdidas de peso.

Por otro lado, las muestras que contienen PCM que sufren una menor pérdida de peso durante el ensayo son las muestras M3 y M5. La muestra M3 contiene un 10 % de RT18 y la muestra M5 contiene un 5 % de RT18 y un 5 % de RT35.

La Figura 4-13 corresponde a una imagen de los 6 tipos de muestras tomada después de finalizar los 10 ciclos de hielo-deshielo.



Figura 4-13. Muestras tras 10 ciclos de hielo-deshielo.

Lo que se puede observar en la Figura 4-13 corresponde con lo que muestra la gráfica de la Figura 4-12. Las muestras M1 y M2 son las que están más dañadas visualmente tras los 10 ciclos de hielo-deshielo. También se observa que las menos dañadas son la M0 (que no contiene PCM), la M3 y la M6; correspondiendo esto con los datos obtenidos en la gráfica.

4.4.2 Choque térmico

En este ensayo se calentaban las muestras hasta una temperatura de 100 °C durante 8 horas, posteriormente se sumergen en agua a temperatura ambiente durante dos horas. Este ciclo se repite 10 veces. Las mediciones se han realizado cada 2 ciclos. En este ensayo se busca ver la pérdida de peso debido a las tensiones internas ocasionadas por la solidificación y fusión del PCM.

A continuación, se observa la siguiente gráfica (Figura 4-14) donde se representa la pérdida de peso en porcentaje de cada muestra a lo largo de los ciclos.

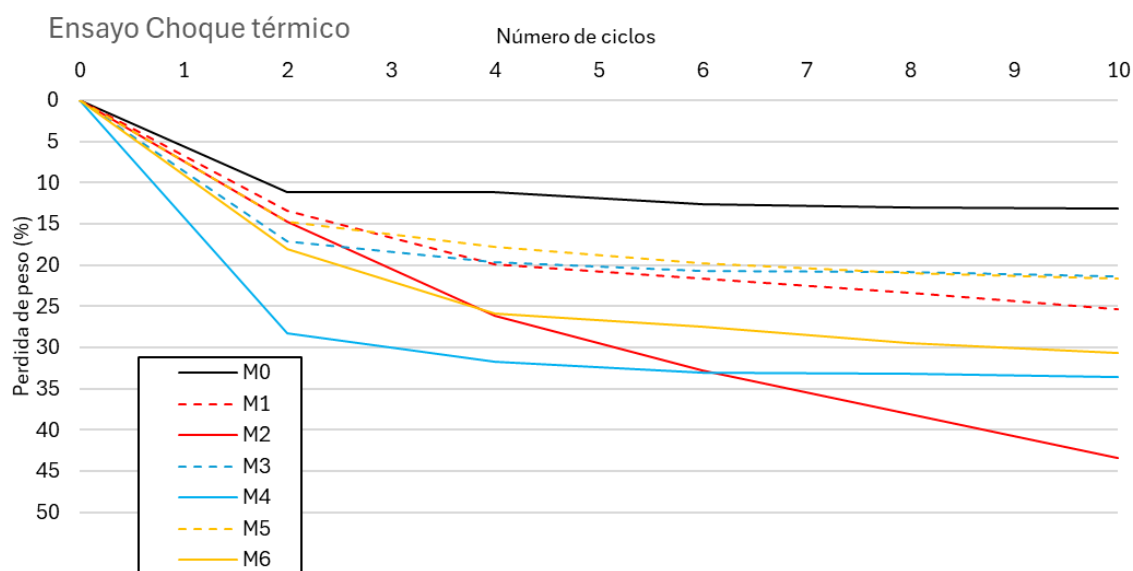


Figura 4-14. Gráfica ensayo choque térmico

Como se puede observar en la Figura 4-14 las muestras M2, M4 y M6 son las muestras que experimentan una mayor pérdida de peso. Esto último coincide con que estas muestras son las que contienen más cantidad de PCM en su interior. Por lo tanto, se puede determinar que cuanto mayor cantidad de PCM tengan las muestras peor se comportarán frente a estos cambios de temperatura.

La muestra M2 tiene una curva con más pendiente ya que es la que más daños superficiales ha sufrido. Sin embargo, estos daños no son grandes como pasa en el hielo-deshielo; las muestras del choque térmico no presentan cambios significativos en su superficie.

4.4.3 Alteración por sales

Este ensayo se ha realizado con tres tipos de sales diferentes, las muestras se han sometido a una serie de ciclos de alteración. Las mediciones de peso se han realizado cada 5 ciclos.

El primer ensayo que se va a analizar es el del Na_2SO_4 . De este ensayo cabe destacar que a partir de los 10 ciclos empezaron a romperse las muestras y a los 12 ciclos ya no quedaba ninguna muestra en buen estado, por esta razón solo existen datos de 10 ciclos. A continuación, en la Figura 4-15 se puede ver la pérdida de peso de las muestras.

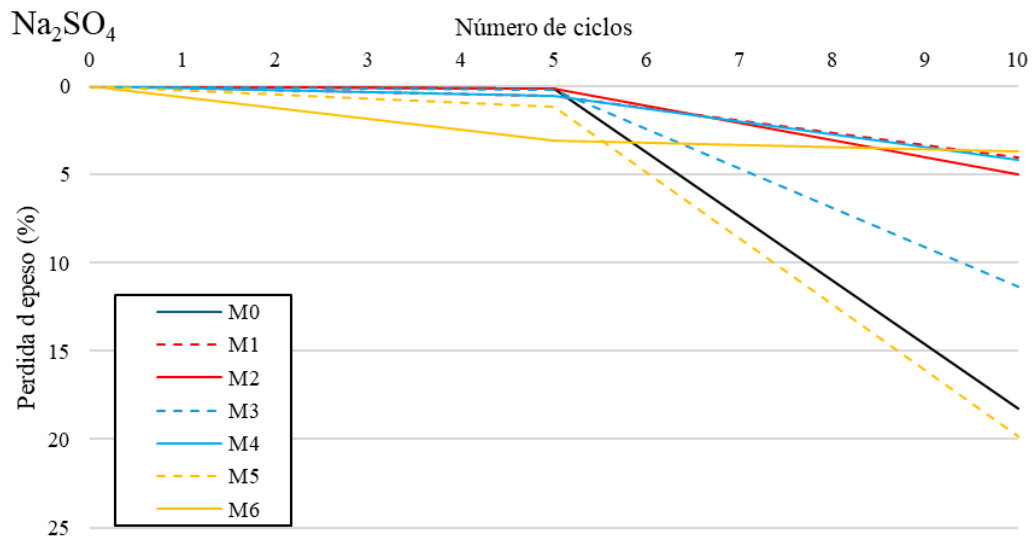


Figura 4-15. Gráfica alteración por Na_2SO_4

La gráfica representa que las muestras M0, M1 y M5 son las que más peso pierden durante los 10 ciclos. Estas muestras coinciden con las muestras que tienen menos cantidad de PCM en su interior. Además, se deduce también que el PCM RT35 y el PCM18 en cantidades de entorno al 20% ayudan a que las muestras sufran una pérdida de peso menor cuando se someten a alteración por Na_2SO_4 .

Como se ha mencionado anteriormente después de 12 ciclos todas las muestras habían experimentado roturas significativas y no se pudo continuar la medición (ver Figura 4-16).



Figura 4-16. Muestras tras 12 ciclos de Na_2SO_4 .

A continuación, se analizarán las muestras que han sido sometidas a alteración mediante agua de mar previamente filtrada. En la Figura 4-17 se ve la pérdida de peso que han sufrido las muestras durante los 15 ciclos.

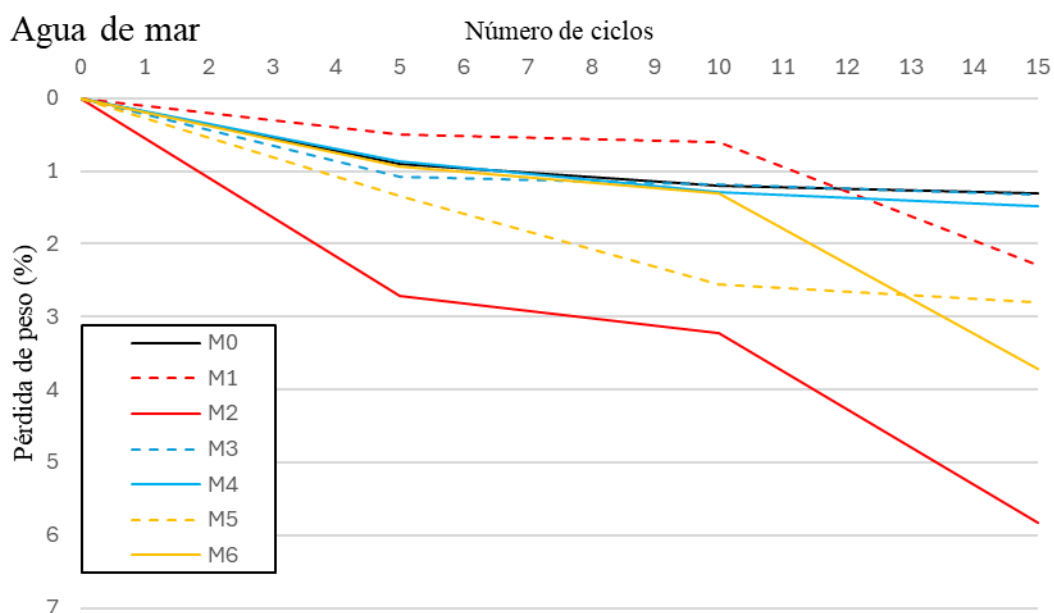


Figura 4-17. Gráfica pérdida de peso por alteración con agua de mar.

Como se puede observar las muestras que sufren una mayor pérdida de peso son las muestras M2 y M6 (se recuerda que estas dos muestras son las que contienen un mayor porcentaje de RT35). Mientras que las muestras M3 y M4 (que no contienen PCM del tipo RT35 y solo contienen del RT18) sufren una pérdida de peso menor. Por lo tanto, el PCM del tipo RT35 no presenta características favorables para este ensayo.

A continuación, analizaremos la pérdida de peso sufrida por las muestras que han estado sometidas al NaCl. Esta pérdida de peso en porcentaje está representada en la gráfica de la Figura 4-18.

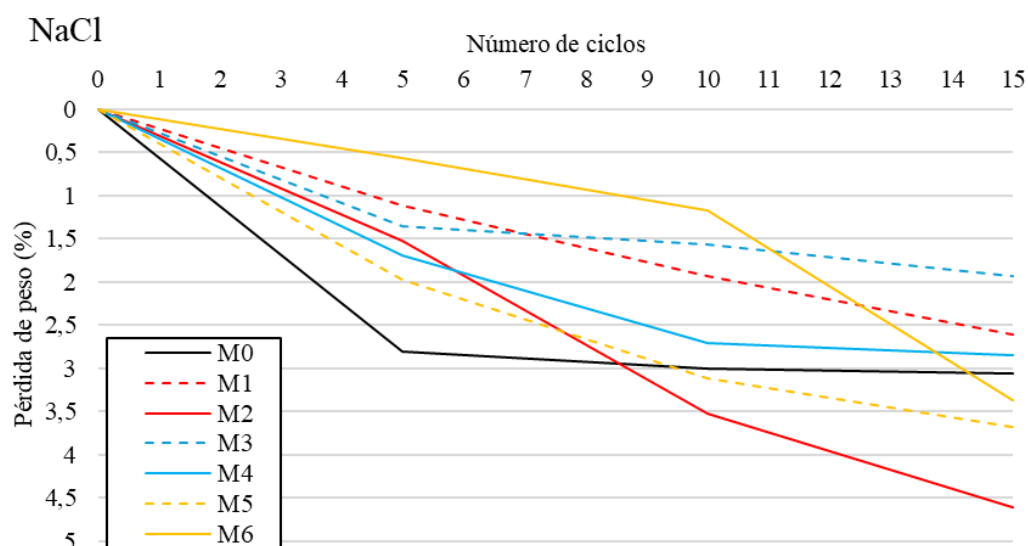


Figura 4-18. Gráfica pérdida de peso alteración por NaCl.

Como se puede observar las muestras que sufren una mayor pérdida de peso son las muestras M5, M2 y M6. Mientras que las muestras M3 y M4 (que no contienen PCM del tipo RT35 y solo contienen del RT18) sufren una pérdida de peso menor. Por lo tanto, el PCM del tipo RT35 no presenta características favorables para este ensayo.

4.5 Análisis termogravimétrico y calorimetría diferencial

4.5.1 Pérdida de peso

A continuación, se representarán los resultados obtenidos en el ensayo de pérdida de peso. En este ensayo todas las muestras sufrían un ciclo de calentamiento hasta alcanzar los 900 °C. En el análisis termogravimétrico se observaron tres zonas de pérdida de peso: una entre 200 y 300, que está asociada con el punto de inflamación del PCM parafínico; otra entre 350 y 450 relacionada con la deshidratación del hidróxido de calcio; y una final entre 500 y 850 relacionada con la descomposición del carbonato de calcio. Los datos no se representan todos en una misma gráfica ya que dificultaría su visualización.

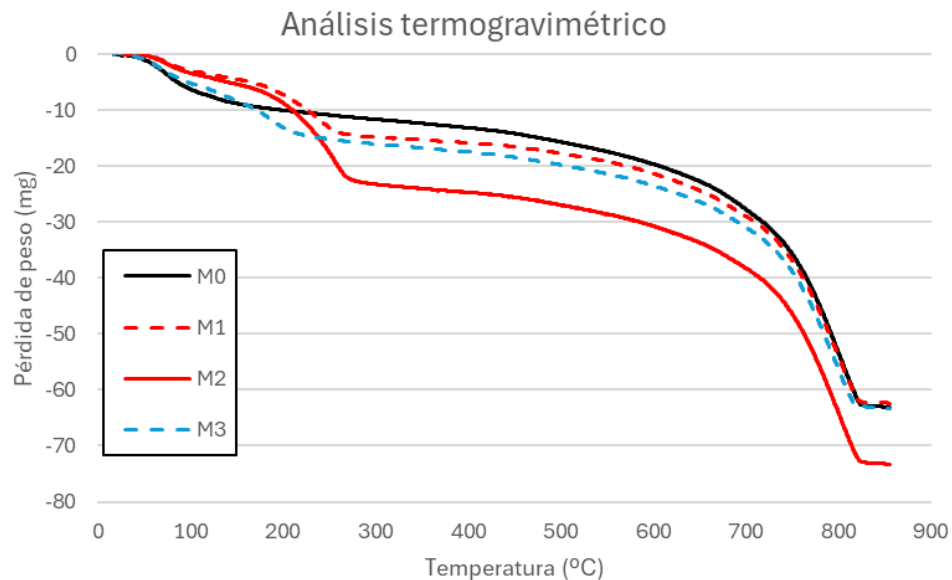


Figura 4-19. Pérdida de peso de las muestras M0, M1, M2 y M3.

En la Figura 4-19. Pérdida de peso de las muestras M0, M1, M2 y M3. Figura 4-19 se puede observar la pérdida de peso que sufren cada una de las muestras representadas en dicho gráfico cuando se calientan hasta una temperatura de 900°C. La muestra M2 (20%RT35) es la que sufre una pérdida de peso mayor, esto se debe a que es la que contiene un porcentaje más elevado de material de cambio de fase. Las muestras M0, M1 y M3 tienen menor pérdida de peso ya que contienen menos PCM (en el caso de M0 no existe PCM en su interior).

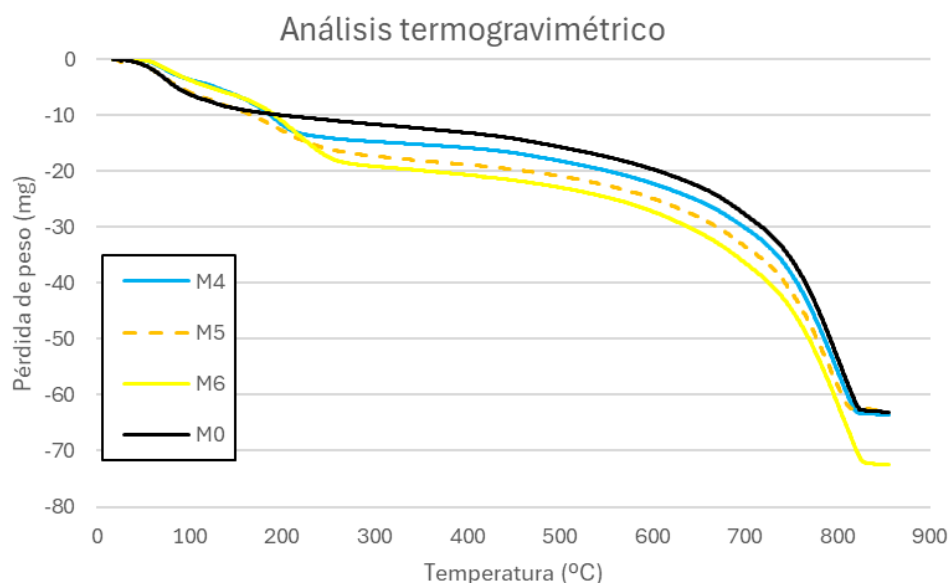


Figura 4-20. Gráfica pérdida de peso M4, M5 y M6.

En la Figura 4-20 se representa la pérdida de peso de las muestras M4, M5 y M6. La muestra M6 (10 % RT35 y 10 % RT18) es la que sufre una mayor pérdida de peso.

En todas las muestras con PCM se puede observar una pérdida inicial de peso, hasta unos 300 °C, principalmente debida a la evaporación de agua contenida en las muestras. Pero a partir de los 600 °C hay la pérdida de peso más significativa. Posiblemente debida a transformaciones químicas de los componentes de las muestras. A continuación, en la Tabla 4-7 se verá cuánto peso total pierde cada una y se extraerán las conclusiones de este ensayo.

	M0	M1	M2	M3	M4	M5	M6
<i>Pérdida de peso (mg)</i>	63,12	62,37	73,3	63,32	63,65	62,79	72,53

Tabla 4-7. Pérdida de peso total ensayo termogravimétrico.

Como se ha visto anteriormente en las gráficas las muestras M2 y M6 son las que sufren una pérdida de peso mayor. Sin embargo, la M4 que contiene también un 20 % de material de cambio de fase sufre unas pérdidas mucho menores; esto es debido a que contiene RT18 en vez de RT35. También las diferencias entre M1 y M2 son mayores que las que existen entre M3 y M4. Por lo tanto, se puede determinar que el RT35 afecta de una manera mucho más radical a la pérdida de peso que el RT18.

4.5.2 *Análisis DSC*

Durante este ensayo las muestras se someten a tres ciclos de calentamiento-enfriamiento entre los 50 °C y 17 °C. En este ensayo se observará el flujo de calor y como varía según la muestra que estemos analizando, en que muestras con PCM se almacena o se libera más energía durante los procesos de solidificación o fusión del PCM (cuando se funde absorbe energía mientras que cuando se solidifica libera energía).

En todas las gráficas se tendrá de referencia la muestra M0 (que no contiene PCM en su interior), para poder visualizar el efecto de los materiales de cambio de fase.

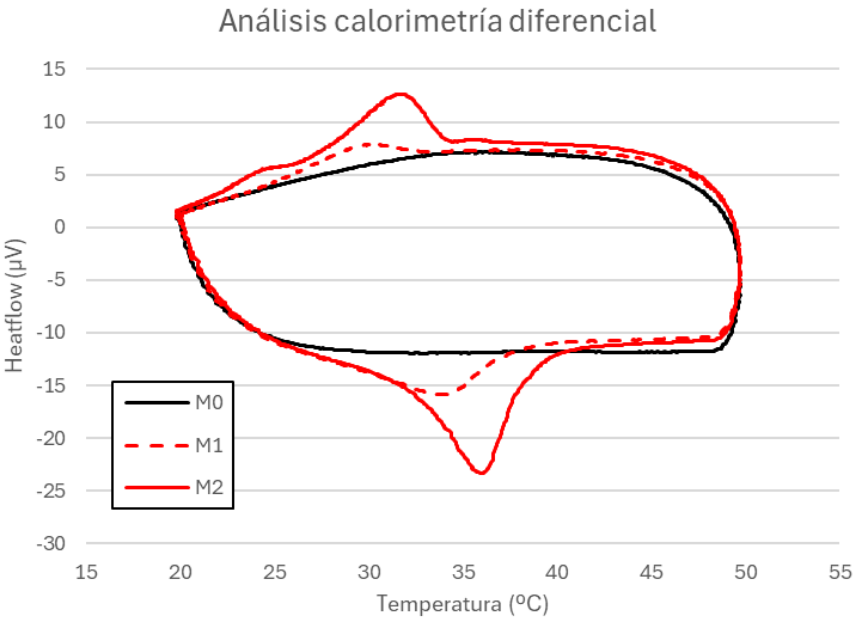


Figura 4-21. Análisis calorimetría diferencial M0, M1 y M2.

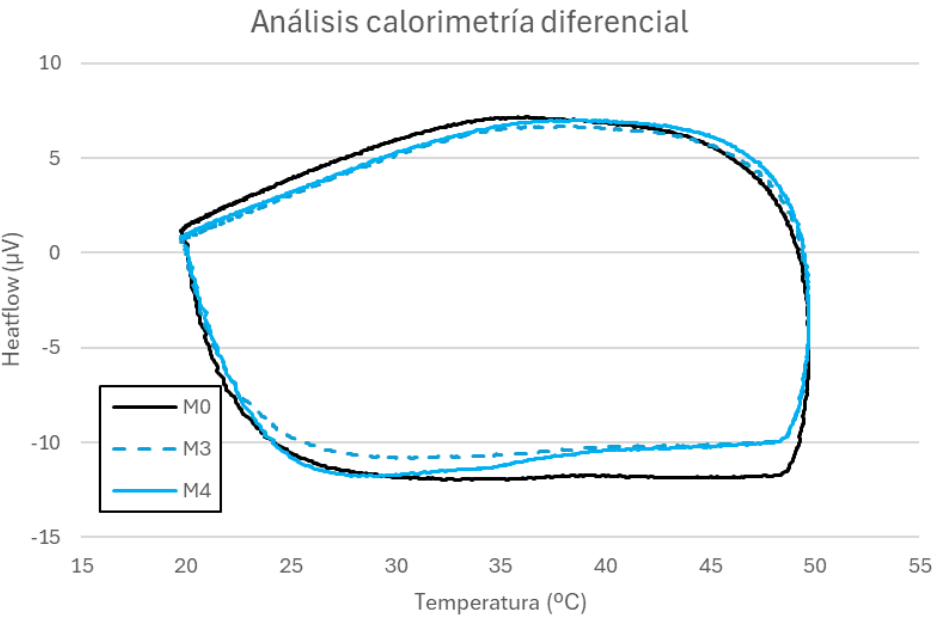


Figura 4-22. Análisis calorimetría diferencial M0, M3 y M4.

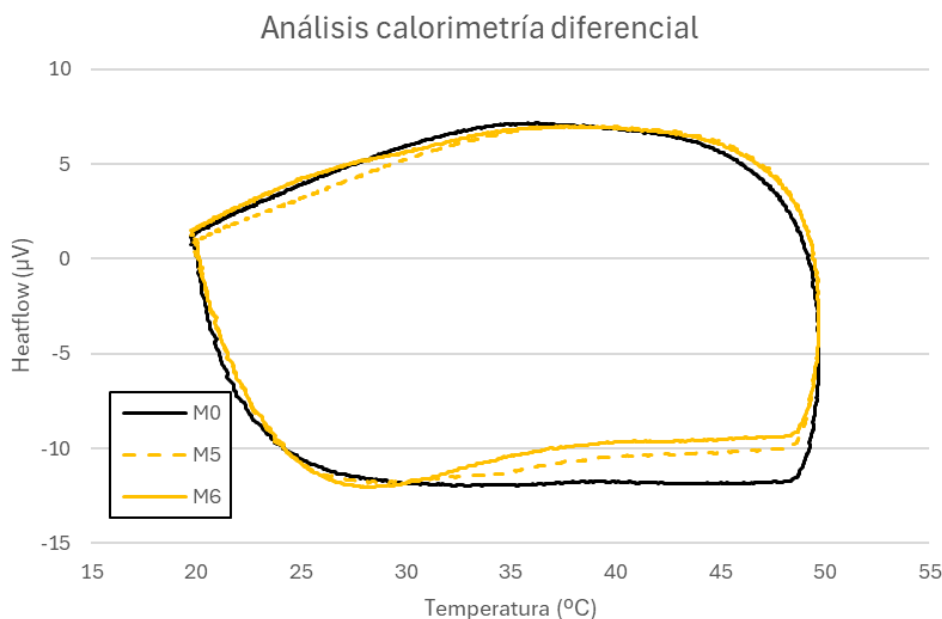


Figura 4-23. Análisis calorimetría diferencial M0, M5 y M6.

En la Figura 4-21, Figura 4-22 y Figura 4-23 se observan dos muestras en cada gráfica con el mismo o los mismos tipos de PCM, pero en distintos porcentajes, además se representa la muestra M0 como referencia. Los picos que se desfasan de la curva negra perteneciente a M0 se deben a la acción del PCM. Estos picos aparecen durante la fusión y la solidificación. Durante la fusión las muestras con PCM absorberán más energía que la muestra sin PCM; es decir el flujo de calor se volverá más negativo. Durante la solidificación se libera energía, por lo tanto, las muestras con PCM tendrán un flujo de calor mayor. Este efecto mencionado con anterioridad se puede ver claramente en la Figura 4-21. Las muestras M1 y M2 presentan los mejores resultados. Visualmente esta gráfica (Figura 4-21) presenta unos picos muy superiores a las demás (Figura 4-22 y Figura 4-23). Esto indica que las muestras M1 y M2 tienen la capacidad de almacenar y liberar más energía. Por lo tanto, se puede concluir que el RT35 es el que mejor se comporta durante este ensayo. En concreto la muestra M2 que contiene un 20 % de RT35 es la que obtiene los mejores resultados.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

A partir de los ensayos realizados se pueden obtener las diferentes conclusiones en relación con los resultados obtenidos:

1. Observando los ensayos de ultrasonidos, porosidad y capilaridad se determina que la muestra que mejor se comporta en todos estos es la M1. Por lo tanto, el PCM RT35 en una cantidad del 10 % es el que genera menor porosidad en el material.
2. Los ensayos termográficos realizados indican:
 - La muestra M2 que contiene un 20 % de RT35 es la que tarda más en enfriarse hasta temperatura ambiente al poner las muestras calientes en agua fría. Esto se debe a que el RT35 cuando la muestra baja de 35 °C durante el ensayo de enfriamiento el PCM se solidifica y libera energía.
 - La muestra M4 que contiene un 20% de RT18 es la que tarda más en calentarse al poner las muestras frías en agua caliente. Esto es debido a que cuando la muestra supera los 18 °C durante el ensayo de calentamiento el PCM se funde y por lo tanto absorbe energía del mortero.
3. Los ensayos de durabilidad nos indican en líneas generales que las muestras con mayor cantidad de PCM sufren variaciones mayores en sus propiedades físicas y mecánicas. La muestra que peor se comporta en los dos ensayos de durabilidad realizados (ensayo de hielo-deshielo y ensayo de choque térmico) es la muestra M2 que contiene un 20 % de RT35.
4. En cuanto a los ensayos de sales se concluye que el Na_2SO_4 es especialmente perjudicial para las muestras de hormigón; ya que se produjo la rotura de todos los morteros entre los 9 y los 12 ciclos de alteración por esta sal. Mientras que en los otros dos ensayos con NaCl y agua de mar filtrada no se produjeron cambios de peso tan significativos ni deterioros superficiales.
5. En cuanto a los análisis termogravimétricos, la muestra M2 es la que más peso pierde debido posiblemente a la descomposición de algunos componentes del material a elevadas temperaturas.
6. En cuanto a los análisis de calorimetría diferencial, la muestra M2 es la muestra que presenta mayor eficiencia de almacenamiento de energía térmica.

De todas las muestras analizadas, la M6 es la que presenta mejores características para su posible aplicación en la edificación. Esta muestra presenta propiedades unas térmicas aceptables y mantiene unas buenas características mecánicas.

5.2 Líneas futuras

La introducción de materiales de cambio de fase (PCM) en el hormigón ofrece un gran potencial para mejorar la eficiencia energética en la construcción. Este estudio explora posibles líneas futuras de investigación en el campo del hormigón con PCM.

1. Los resultados están condicionados por la refrigeración del equipo Labsys EVO 1180. Como se usa agua a temperatura ambiente para refrigerar el equipo, y a pesar de que los ensayos se realizaron en periodo invernal, no se conseguía bajar la temperatura del horno del equipo de aproximadamente 17 °C. El PCM RT18 tiene una temperatura de cambio de estado en torno a los 18 °C. Por lo tanto, sería conveniente realizar los ensayos con un equipo que pudiese refrigerar por debajo de 15 °C.
2. Análisis del potencial de ahorro energético en una maqueta de una casa utilizando hormigón con PCM.
3. Investigación sobre el desarrollo de nuevos tipos de PCM para su uso en hormigón, centrándose en mejorar la durabilidad y la estabilidad a largo plazo.
4. Estudio de la viabilidad económica y la escalabilidad de la producción de hormigón con PCM para su aplicación en proyectos de construcción comercial y residencial.
5. Exploración de estrategias de diseño arquitectónico que maximicen los beneficios del hormigón con PCM en términos de confort térmico y eficiencia energética.
6. Investigación sobre la implementación de normativas y estándares de construcción que promuevan el uso de hormigón con PCM como una solución viable para mejorar la eficiencia energética de los edificios.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] United Nations, «Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development | Department of Economic and Social Affairs». Accedido: 9 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://sdgs.un.org/2030agenda>
- [2] «Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico». Accedido: 9 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es.html>
- [3] «Balance Energetico España 2021 y 2022_v0.pdf». Accedido: 10 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/energia/files-1/balances/Balances/Documents/balance-20231218/Balance%20Energetico%20Espa%C3%B1a%202021%20y%202022_v0.pdf
- [4] «81582725.pdf». Accedido: 16 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/81582725.pdf>
- [5] «PCM de MikroCaps | MikroCaps d.o.o.», MikroCaps, izdelki in tehnologije mikrokapsulacije. Accedido: 16 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.mikrocaps.com/es/productos/pcm-de-mikrocaps/>
- [6] A. T. Domínguez y C. F. Gallego, «Transición hacia edificios de energía casi nula en Europa».
- [7] «Libro_Energia_Espana_2020.pdf». Accedido: 11 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/energia/files-1/balances/Balances/LibrosEnergia/Libro_Energia_Espana_2020.pdf
- [8] «Materiales de cambio de fase (PCM)», Thermttest Latin America. Accedido: 11 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://thermttest.com/latinamerica/materiales-de-cambio-de-fase-pcm>
- [9] J. A. Tenorio Ríos, «Ahorro energetico en edificios mediante el almacenamiento estructural con materiales de cambio de fase.», <http://purl.org/dc/dcmitype/Text>, Universidad de Sevilla, 2014. Accedido: 29 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=112759>

- [10] D. Bravo Hidalgo, «Una Revisión sobre Materiales para Almacenamiento de Energía Solar Térmica», *Ingeniería*, vol. 23, n.o 2, pp. 144-165, ago. 2018, doi: 10.14483/23448393.12510.
- [11] V. A. Zetola Vargas, «Morteros acumuladores con parafinas microencapsuladas para el aprovechamiento de la energía solar en suelos radiantes», PhD Thesis, Universidad Politécnica de Madrid, 2013. doi: 10.20868/UPM.thesis.21573.
- [12] J. L. E. Sáiz, «Análisis sobre el almacenamiento térmico en la edificación», *Inf. Constr.*, vol. 43, n.o 416, Art. n.o 416, dic. 1991, doi: 10.3989/ic.1991.v43.i416.1366.
- [13] I. Dincer, S. Dost, y X. Li, «Performance analyses of sensible heat storage systems for thermal applications», *Int. J. Energy Res.*, vol. 21, n.o 12, pp. 1157-1171, 1997, doi: 10.1002/(SICI)1099-114X(19971010)21:12<1157::AID-ER317>3.0.CO;2-N.
- [14] «TAZ-TFG-2020-3957_ANE.pdf». Accedido: 29 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://zaguan.unizar.es/record/96383/files/TAZ-TFG-2020-3957_ANE.pdf
- [15] G. Alva, Y. Lin, y G. Fang, «An overview of thermal energy storage systems», *Energy*, vol. 144, pp. 341-378, feb. 2018, doi: 10.1016/j.energy.2017.12.037.
- [16] «Graphene aerogel-based phase changing composites for thermal energy storage systems | Journal of Materials Science». Accedido: 29 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10853-019-04325-7>
- [17] E. I. Rodríguez Ubiñas, «Almacenamiento de energía térmica por calor latente en los edificios: bases para la optimización de aplicaciones pasivas, opacas y traslúcidas», PhD Thesis, Universidad Politécnica de Madrid, 2015. doi: 10.20868/UPM.thesis.40328.
- [18] A. Moropoulou, A. Bakolas, y K. Bisbikou, «Investigation of the technology of historic mortars», *J. Cult. Herit.*, vol. 1, n.o 1, pp. 45-58, ene. 2000, doi: 10.1016/S1296-2074(99)00118-1.
- [19] «¿Qué es el mortero y para qué sirve? | Chryso». Accedido: 22 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.chryso.es/news/788/que+es+un+mortero+y+para+que+sirve>
- [20] «tesisUPV2517.pdf». Accedido: 22 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/1941/tesisUPV2517.pdf?sequence...>
- [21] «Jové - 2018 - Tema 2 CONGLOMERANTES Y CONGLOMERADOS.pdf». Accedido: 22 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/32421/C3T02_Conglomerantes%20y%20Conglomerados_Jove%2CF%282018%29.pdf?sequence=1
- [22] P. E. HALSTEAD, «The Early History of Portland Cement», *Trans. Newcom. Soc.*, ene. 1961, doi: 10.1179/tns.1961.003.
- [23] «Portero y José - Ingeniería Química y Nuclear.pdf». Accedido: 22 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/146535/Mu%C3%B1oz%20-%20Procesamiento%20de%20materiales%20conglomerantes:%20cal,%20yeso%20y%20cemento.pdf?sequence=1>

- [24] «Valles et al. - Estudio y análisis de la utilización de la cal par.pdf». Accedido: 22 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/60200/Memoria.pdf>
- [25] W. H. Duda, Manual tecnológico del cemento. Reverte, 2021.
- [26] F. Gomá, El cemento Portland y otros aglomerantes. Reverte, 1979.
- [27] P. Hewlett, Lea's Chemistry of Cement and Concrete. Elsevier, 2003.
- [28] «5 Anexo Etxeberria y Berrido.pdf». Accedido: 22 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/1979/5%20Anexo%20Etxeberria%20y%20Berrido.pdf?sequence=33&isAllowed=y>
- [29] A. Bustos García, «Morteros con propiedades mejoradas de ductilidad por adición de fibras de vidrio, carbono y basalto», PhD Thesis, Universidad Politécnica de Madrid, 2018. doi: 10.20868/UPM.thesis.54114.
- [30] M. Peñalver, «Los áridos como materia prima».
- [31] P. Domone y J. Illston, Construction Materials: Their Nature and Behaviour, Fourth Edition. CRC Press, 2010.
- [32] D. Gaspar-Tebar, «Aditivos para hormigones, morteros y pastas: generalidades, clasificación y definiciones», Inf. Constr., vol. 34, n.o 340, Art. n.o 340, may 1982, doi: 10.3989/ic.1982.v34.i340.2107.
- [33] A. M. M. Pachon, «EVALUACIÓN COMPARATIVA DEL EFECTO DE ADITIVOS REDUCTORES, MANEJADORES Y SU MEZCLA EN MORTEROS».
- [34] P.-C. Aïtcin y R. J. Flatt, Science and Technology of Concrete Admixtures. Woodhead Publishing, 2015.
- [35] E. Malabag, «Chemical Admixtures for Concrete, 3rd ed, by Rixom R. M.», Accedido: 29 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/38595860/Chemical_Admixtures_for_Concrete_3rd_ed_by_Rixom_R_M_
- [36] Y. S. Ranjbaran, S. J. Haghighparast, M. H. Shojaeefard, y G. R. Molaeimanesh, «Numerical evaluation of a thermal management system consisting PCM and porous metal foam for Li-ion batteries», J. Therm. Anal. Calorim., vol. 141, n.o 5, pp. 1717-1739, sep. 2020, doi: 10.1007/s10973-019-08989-w.
- [37] «Evaluación de impacto ambiental mediante análisis de ciclo de vida (ACV) de la incorporación de materiales de cambio de fase (PCM) en edificación - Repositorio Institucional de Documentos». Accedido: 5 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://zaguan.unizar.es/record/48555?ln=es>
- [38] A. Oliver, F. J. Neila, y A. García-Santos, «Clasificación y selección de materiales de cambio de fase según sus características para su aplicación en sistemas de almacenamiento de energía térmica», Mater. Constr., vol. 62, n.o 305, pp. 131-140, mar. 2012, doi: 10.3989/mc.2012.58010.

- [39] S. O. Campos Maya, «Incorporación de PCM en elementos constructivos para la mejora energética», Master thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2010. Accedido: 5 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/13402>
- [40] H. Abenza Lasso de la Vega, «Caracterización experimental de la degradación de las propiedades termofísicas de un material de cambio de fase (PCM) sometido a procesos con altos niveles de esfuerzos cortantes», Experimental characterisation of the cycling stability and thermal degradation of a Phase Change Material (PCM) in a high shear stress process, jul. 2020, Accedido: 5 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.upct.es/handle/10317/8925>
- [41] «Materiales de construcción : 62, 305, 2012», Mater. Constr. - Trimest. Three-Mon., vol. 62, n.o 305, pp. 1-146, 2012, Accedido: 5 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.torrossa.com/en/resources/an/2495330>
- [42] M. Aguas De Hoyos, «Análisis del comportamiento de materiales para el almacenamiento de energía térmica solar mediante cambio de fase», 2016, Accedido: 5 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/59210>
- [43] C. de la C. Bustamante González, «Caracterización de los materiales de cambio de fase para el almacenamiento de energía», 2023, Accedido: 5 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://academica-e.unavarra.es/xmlui/handle/2454/45871>
- [44] Q. Duan, F. L. Tan, y K. C. Leong, «A numerical study of solidification of n-hexadecane based on the enthalpy formulation», J. Mater. Process. Technol., vol. 120, n.o 1, pp. 249-258, ene. 2002, doi: 10.1016/S0924-0136(01)01188-8.
- [45] «Materials | Free Full-Text | Macro-Encapsulation of Inorganic Phase-Change Materials (PCM) in Metal Capsules». Accedido: 6 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1996-1944/11/9/1752>
- [46] angelsinocencio, «Material de Cambio de Fase (PCM), inercia térmica 100 veces más eficiente», Ángel Sánchez Inocencio. Accedido: 6 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://angelsinocencio.com/material-de-cambio-de-fase-pcm-inercia-termica-100-veces-mas-eficiente/>
- [47] G. Ascensão, «Development and characterization of multifunctional mortars», 2015. doi: 10.13140/RG.2.2.23280.81921.
- [48] «Materials | Free Full-Text | Preparation and Characterization of Microencapsulated Phase Change Materials for Use in Building Applications». Accedido: 6 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1996-1944/9/1/11>
- [49] «La Resistencia al Impacto». Accedido: 13 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://todoenpolimeros.com/2017/01/04/la-resistencia-al-impacto/>
- [50] «Durómetros portátiles de rebote LEEB - Equotip Proceq», UMI: Útiles y Máquinas Industriales. Accedido: 13 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.umi.es/productos/dureza-leeb/>

- [51] «Monteagudo et al. - EVALUACIÓN ESTRUCTURAL MEDIANTE ULTRASONIDOS DEL E.pdf». Accedido: 13 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://oa.upm.es/12531/3/INVE_MEM_2011_105981.pdf
- [52] «TESIS_EdFinalEntrega.pdf». Accedido: 13 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/78866/TESIS_EdFinalEntrega.pdf
- [53] C. Guardia Martín, «Nuevos morteros de cemento-cal con materiales de cambio de fase (PCM) para la mejora de la eficiencia energética de cerramientos», 2021, Accedido: 13 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://ebuah.uah.es/dspace/handle/10017/50904>
- [54] «UNE-EN 14579:2005 Métodos de ensayo para piedra natural: Deter...» Accedido: 13 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0034000>
- [55] «UNE-EN 1925:1999 Métodos de ensayo para piedra natural. Determ...» Accedido: 19 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0010084>
- [56] «Capillary Rise in Granitic Rocks: Interpretation of Kinetics on the Basis of Pore Structure - ScienceDirect». Accedido: 19 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0021979799966122>
- [57] I. Moreu Rubio y M. Solla Carracelas (advisor), «Estudio de la ubicación y diseño de una base semipermanente de una agrupación reforzada de desembarco de Infantería de Marina», oct. 2018, Accedido: 20 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://calderon.cud.uvigo.es/handle/123456789/432>
- [58] «UNE-EN 12371:2011 Métodos de ensayo para piedra natural. Deter...» Accedido: 20 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0046626>
- [59] «UNE-EN 14066:2014 Métodos de ensayo para piedra natural. Deter...» Accedido: 4 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0052555>
- [60] N. Zhu, S. Li, P. Hu, S. Wei, R. Deng, y F. Lei, «A review on applications of shape-stabilized phase change materials embedded in building enclosure in recent ten years», *Sustain. Cities Soc.*, vol. 43, pp. 251-264, nov. 2018, doi: 10.1016/j.scs.2018.08.028.
- [61] Y. P. Zhang, K. P. Lin, R. Yang, H. F. Di, y Y. Jiang, «Preparation, thermal performance and application of shape stabilized PCM in energy efficient buildings», *Energy Build.*, vol. 38, n.o 10, pp. 1262-1269, oct. 2006, doi: 10.1016/j.enbuild.2006.02.009.

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, Y/O ECONÓMICAS, Y/O AMBIENTALES

El análisis de morteros de hormigón con materiales de cambio de fase tiene importantes implicaciones sociales, económicas y ambientales.

Desde una perspectiva social, la implementación de hormigón con PCM en la construcción puede contribuir significativamente a mejorar la calidad de vida de las personas al proporcionar un entorno habitable más confortable y saludable. Esto es especialmente relevante en regiones con climas extremos, donde el hormigón con PCM puede ayudar a mitigar los efectos adversos del calor o del frío excesivo, promoviendo así el bienestar y la seguridad de la población.

Desde un punto de vista económico, la adopción de morteros de hormigón con PCM puede aumentar la eficiencia energética de los edificios, lo que a su vez puede reducir los costos operativos a largo plazo para los propietarios y usuarios. Al mejorar la capacidad de regulación térmica de los edificios, el uso de hormigón con PCM puede disminuir la necesidad de sistemas de calefacción y refrigeración convencionales, lo que se traduce en ahorros significativos en los costos de energía a lo largo del tiempo. Además, la mayor durabilidad y resistencia al desgaste de los morteros de hormigón con PCM pueden reducir los costos de mantenimiento y reparación de los edificios, lo que resulta en un menor costo total de propiedad. Estos beneficios económicos pueden hacer que la inversión inicial en la implementación de hormigón con PCM sea más atractiva para los desarrolladores, constructores y propietarios de edificios, fomentando así su adopción más amplia en el mercado de la construcción.

En cuanto a las implicaciones ambientales, la utilización de hormigón con PCM puede contribuir a reducir el consumo de energía en los edificios al mejorar su eficiencia energética. Esto puede tener un impacto positivo en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y en la lucha contra el cambio climático. Además, la producción de morteros de hormigón con PCM puede ser más sostenible que la de materiales convencionales si se utilizan materias primas renovables y se minimiza el uso de recursos no renovables.

En resumen, el análisis de morteros de hormigón con PCM no solo busca avanzar en el conocimiento científico y técnico, sino que también busca abordar desafíos sociales, económicos y ambientales relevantes para la sociedad actual. La implementación exitosa de estas soluciones innovadoras puede tener un impacto positivo en la calidad de vida de las personas, en la economía y en el medio ambiente, contribuyendo así al desarrollo sostenible a largo plazo.

.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

La implementación de morteros de hormigón con materiales de cambio de fase plantea importantes consideraciones éticas y sociales en relación con la equidad y la justicia. Si bien el uso de hormigón con PCM puede mejorar la calidad de vida al proporcionar un confort térmico óptimo en los edificios, es fundamental considerar cómo esta tecnología puede impactar de manera desigual a diferentes grupos sociales. Es necesario asegurar que los beneficios de esta innovación estén disponibles para todos, especialmente para aquellos que viven en condiciones de vulnerabilidad económica o social.

Es esencial abordar los posibles riesgos y preocupaciones éticas asociados con el uso de materiales químicos en los PCM, como la seguridad humana y ambiental, la transparencia en la toma de decisiones y la participación pública en el proceso. Garantizar la equidad en el acceso a edificios con hormigón con PCM y la inclusión de las comunidades en la planificación y ejecución de proyectos son aspectos fundamentales para promover la justicia social y la responsabilidad ambiental.

Por lo tanto, el análisis de morteros de hormigón con PCM no solo implica desafíos técnicos y científicos, sino también importantes consideraciones éticas y sociales que deben abordarse de manera integral. Es necesario adoptar un enfoque ético y centrado en las personas para garantizar que la implementación de esta tecnología contribuya a la creación de entornos habitables seguros, equitativos y sostenibles para todas las personas.