



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Aplicación de materiales de cambio de fase para la mejora
térmica de morteros de cal y cemento*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Carlos Sanz López

DIRECTORES: Miguel Ángel Álvarez Feijoó
Rocío Maceiras Castro

CURSO ACADÉMICO: 2022-2023

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Aplicación de materiales de cambio de fase para la mejora
térmica de morteros de cal y cemento*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

El creciente consumo de energía ha traído la necesidad de buscar vías de ahorro. En el presente trabajo se investiga el empleo de materiales de cambio de fase (PCM) en el ámbito de la construcción con el fin de lograr un confort térmico sin incrementar el gasto energético para ello.

La investigación estudia el comportamiento de 7 muestras de morteros de cal con diferentes porcentajes de PCM RT35 y RT18 en su composición. Entre estas muestras hay una que será la de referencia, es decir, no contiene ningún tipo de PCM. La finalidad es poder hallar los beneficios que aportan los PCM para distintos tipos de ensayos con respecto al tradicional mortero de cal.

Los ensayos que se realizan son: porosidad, capilaridad, alteración por sales, porosidad abierta, ciclos de hielo-deshielo, choque térmico y variación de temperatura y pérdida de masa a través de análisis termogravimétrico.

La conclusión obtenida tras cada prueba refleja el rendimiento real en el ámbito de la construcción identificando cuál es la combinación de PCM que mejor reacciona ante cada prueba. De esta manera, se consigue determinar el tipo de mortero de cal que, según las condiciones a las que se les somete, logra reducir costes económicos en uso de energía y aumentar la durabilidad de las construcciones.

PALABRAS CLAVE

Mortero, material de cambio de fase (PCM), construcción, eficiencia energética.

AGRADECIMIENTOS

A lo largo de estos cinco largos años de formación en la Escuela Naval Militar han sido numerosas personas las que me han apoyado desinteresadamente impulsándome a ser mejor y hacer más ameno mi viaje. En particular, quiero agradecerérselo a:

- A mis padres Juan Carlos, Pilar y mi hermano Rubén que siempre han estado ahí cuando les he necesitado apoyándome y guiándome haciéndolo lo mejor que podían. Sin ellos nunca habría empezado este camino y, por supuesto, tampoco lo habría terminado.
- Al estudio 216: Nat, Julio, Madeje, Pedro, Chema y Germán que durante los últimos dos años han conseguido que los días en este lugar sean más llevaderos y hagan de este sitio un hogar.
- A mis tutores, por su trabajo continuo e interés en este Trabajo Fin de Grado guiándome en cómo realizar la investigación y mejorar mi capacidad de redacción.
- A todas esas personas que, aunque hoy no estén a mi lado, han sido mi gran apoyo en momentos de flaqueza y debilidad. Gracias por enseñarme tanto y estar a mi lado durante tanto tiempo demostrándome que con amor y paciencia se consigue todo, incluso dar la vuelta al mundo en tiempos de COVID-19.

En general, gracias a todos por hacer mi vida más feliz durante esta etapa de mi vida que se acaba.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	7
1 Introducción y objetivos.....	8
1.1 Introducción a la situación actual.....	8
1.2 Motivación	12
1.3 Objetivos	12
2 Estado del arte	13
2.1 Almacenamiento de energía térmica.....	13
2.1.1 Generalidades	13
2.1.2 Almacenamiento en forma de calor sensible (SHS).....	14
2.1.3 Almacenamiento en forma de calor latente (LHS).....	14
2.2 Morteros	16
2.2.1 Generalidades	16
2.2.2 Componentes de los morteros.....	16
2.2.3 Mortero de cal.....	22
2.2.4 Mortero de cemento	23
2.3 Materiales de cambio de fase (PCM).....	24
2.3.1 Generalidades	24
2.3.2 Clasificación de PCM	25
2.3.3 PCM en edificaciones	28
3 Desarrollo del TFG.....	31
3.1 Materiales.....	31
3.1.1 Morteros de cal y cemento.....	31
3.1.2 PCM.....	33
3.2 Metodología experimental	35
3.2.1 Caracterización del mortero de cal	35
3.2.2 Ensayos de durabilidad	39
3.2.3 Análisis termogravimétrico y calorimetría de barrido diferencial.....	41
3.2.4 Análisis termográfico.....	46
4 Resultados	47
4.1 Caracterización del mortero de cal.....	47
4.1.1 Capilaridad.....	48

4.1.2 Porosidad	49
4.2 Ensayos de durabilidad	50
4.2.1 Alteración por sales	51
4.2.2 Propiedades mecánicas: carbonatación con fenolftaleína.....	52
4.3 Análisis termogravimétrico y calorimetría de barrido diferencial	53
4.4 Análisis termográfico	58
5 Conclusiones y líneas futuras	64
5.1 Conclusiones	64
5.2 Líneas futuras	64
6 Bibliografía.....	66
Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales	71
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Desglose generación electricidad bruta [4].....	9
Figura 1-2 Desglose de energía primaria [4].....	9
Figura 1-3 Consumo final de energía [7]	11
Figura 1-4 Consumo energético unitario según el tipo de vivienda [54]	12
Figura 2-1 Almacenamiento de la energía [10].....	13
Figura 2-2 PCM en la zona de calor latente [13]	15
Figura 2-3 Ciclo de la cal [18].....	18
Figura 2-4 Industrias de aplicación de la cal [18]	18
Figura 2-5 Materiales PCM según entalpía y temperatura de fusión [8]	24
Figura 2-6- Clasificación de los PCM [32]	25
Figura 2-7 Parafina de calor latente [36].....	26
Figura 2-8 PCM en la construcción [44]	29
Figura 2-9 Esquema de funcionamiento PCM micro-encapsulado [47]	30
Figura 3-1 Morteros de cal y cemento.....	31
Figura 3-2 Arena de sílice y cemento.....	33
Figura 3-3 PCM RT35.....	34
Figura 3-4 Altura del agua en capilaridad	37
Figura 3-5 Muestras de cal bajo capilaridad	37
Figura 3-6 Muestras de cal antes de someterse a porosidad.....	38
Figura 3-7 Muestras de cal después de someterse a porosidad	38
Figura 3-8 Morteros de cal en sulfato de sodio	40
Figura 3-10 Morteros de cal conservados en vacío	42
Figura 3-9 Equipo Labsys Evo 1180 [43]	42
Figura 3-11 Identificación de las muestras de mortero	43
Figura 3-12 Ciclos de variación de temperatura.....	43
Figura 3-13 Ciclo de pérdida de peso.....	43
Figura 3-15 Programación de pérdida de peso en “Acquisition”	44
Figura 3-14 Programación de ciclos de variación de temperaturas en “Acquisition”	44
Figura 3-16 Programación de parámetros en el software Acquisition del equipo.....	45
Figura 3-17 Pocillo con muestra de cal	45
Figura 4-1 Capilaridad morteros de cal	48
Figura 4-2 Porosidad morteros de cal.....	50
Figura 4-3 Muestras de cal tras el primer ciclo de alteración por sales	51

Figura 4-4 Morteros de cal antes del secado del tercer ciclo	51
Figura 4-5 Morteros de cal después del secado del tercer ciclo	51
Figura 4-6 Morteros de cal descompuestos tras proceso de desalinización	52
Figura 4-7 Carbonatación con fenolftaleína en morteros de cal	52
Figura 4-8 Pérdida de peso de la muestra de referencia M0	53
Figura 4-9 Pérdida de peso de M1.....	54
Figura 4-10 Pérdida de peso de M2.....	54
Figura 4-11 Pérdida de peso de M3.....	55
Figura 4-12 Pérdida de peso de M4.....	55
Figura 4-13 Pérdida de peso de M5.....	56
Figura 4-14 Pérdida de peso de M6.....	56
Figura 4-15 Variación de temperatura morteros de cal	57
Figura 4-16 Ensayo de enfriamiento M0-M1-M2	58
Figura 4-17 Ensayo de enfriamiento M3-M4-M5-M6	59
Figura 4-18 Fotografía térmica al inicio del ensayo de enfriamiento	59
Figura 4-19 Fotografía térmica a mitad del ensayo de enfriamiento.....	60
Figura 4-20 Fotografía térmica al finalizar el ensayo de enfriamiento	60
Figura 4-21 Ensayo de calentamiento M0-M1-M2	61
Figura 4-22 Ensayo de calentamiento M3-M4-M5-M6	61
Figura 4-23 Fotografía térmica al inicio del ensayo de calentamiento	62
Figura 4-24 Fotografía térmica a mitad del ensayo de calentamiento.....	62
Figura 4-25 Fotografía térmica al finalizar el ensayo de calentamiento	63

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Ventajas y desventajas almacenamiento energía en forma de calor latente [14]	15
Tabla 2-2 Clasificación según el tipo de roca [24]	21
Tabla 2-3 Tipos de áridos según su aplicación [24]	21
Tabla 2-4 Tipos de morteros de cal [28]	23
Tabla 2-5 Ventajas de los morteros puros de cal [29]	23
Tabla 2-6 Propiedades de los morteros de cemento [26]	24
Tabla 2-7- Comparativa PCM orgánico e inorgánico [34]	26
Tabla 3-1 Composición de los morteros de cal	32
Tabla 3-2 Componentes de los morteros de cemento	33
Tabla 3-3 Porcentaje de PCM por muestra de cal	35
Tabla 3-4 Porcentaje de PCM por muestra de cemento	35
Tabla 4-1 Peso seco, saturado e hidrostático	47
Tabla 4-2 Porosidad abierta morteros de cal	47
Tabla 4-3 Cantidad de agua absorbida por capilaridad	49
Tabla 4-4 Cantidad de agua absorbida por porosidad	50
Tabla 4-5 Frente de carbonatación en morteros de cal	53
Tabla 4-6 Pérdida de masa morteros de cal	56

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción a la situación actual

El consumo de energía es una necesidad mundial que provoca preocupaciones en cuanto a su posible escasez en los años venideros. Es por ello que cobra tanta importancia en el ámbito social, económico y medioambiental. En vista a la preocupación que este problema está provocando, hay ciertos organismos internacionales como la ONU que han marcado unos objetivos claros para un largo plazo. Estos objetivos, en cuanto a energía se refiere, hacen un gran hincapié en el uso de energías renovables poniendo como fecha objetivo el año 2030. Entre estas metas a lograr podemos encontrar el acceso universal a servicios energéticos asequibles, fiables y modernos, aumentar la proporción de energía renovable en el conjunto de fuentes energéticas, duplicar la tasa mundial de mejora de la eficiencia energética, aumentar la cooperación internacional facilitando el acceso a investigar energías limpias menos contaminantes que los combustibles fósiles, etc. [1]

Actualmente, España es uno de los principales consumidores de energía en Europa. Según el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, en 2019, el consumo total de energía en España fue de 98,7 millones de toneladas de petróleo equivalente (Mtep). Sin embargo, el consumo de energía renovable en España ha aumentado significativamente en los últimos años, y en 2019 alcanzó los 30,4 Mtep, lo que representa el 30,9 % del consumo total de energía. En comparación, el consumo de energía no renovable en España en 2019 fue de 68,3 Mtep, lo que representa el 69,1 % del consumo total. Aunque el consumo de energía renovable ha aumentado, todavía hay una gran brecha entre este tipo de energía y la no renovable. [2]

España utiliza un sistema de generación mixto para garantizar el suministro de la energía eléctrica en todo momento. Según el Libro de la Energía en España 2019 [3], con respecto al año 2018, la generación de electricidad bruta total está encabezada por fuentes que consisten en la recuperación de calor suponiendo un aumento del 40,43 %. En segundo lugar, se encuentra la generación por energía solar habiendo aumentado ésta en un 18,51 %. A continuación, se encuentra la energía eólica con un aumento del 9,33 % y finalmente la energía nuclear con un aumento del 4,63 %. Por otra parte, ha disminuido la generación de electricidad por energía hidráulica un 26,98 % y los combustibles fósiles un 0,87 %. Por lo tanto, se ve cómo se utilizan las energías renovables para la producción de la electricidad, aunque pudiendo mejorar estos datos. En la Figura 1-1 se puede comprobar gráficamente estos datos.

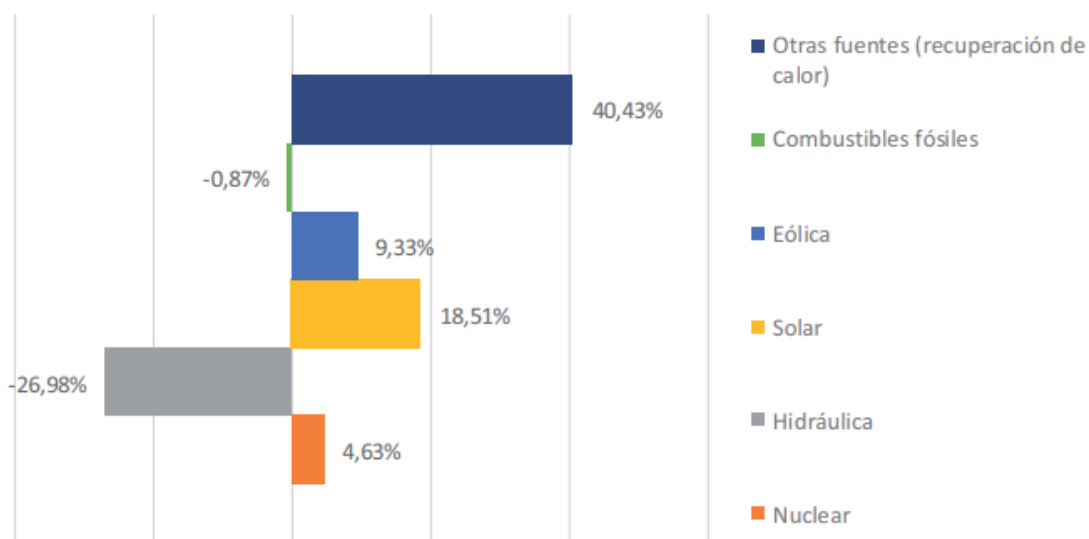


Figura 1-1 Desglose generación electricidad bruta [4]

En la Figura 1-2 se puede observar cómo a lo largo de los años las energías renovables se han utilizado en nuestro país en cuanto al consumo de energía primaria se refiere ocupando uno de los medios menos significativos en comparación con el resto. Es por ello por lo que el gobierno español se ha puesto objetivos incentivando más el uso de energías renovables.

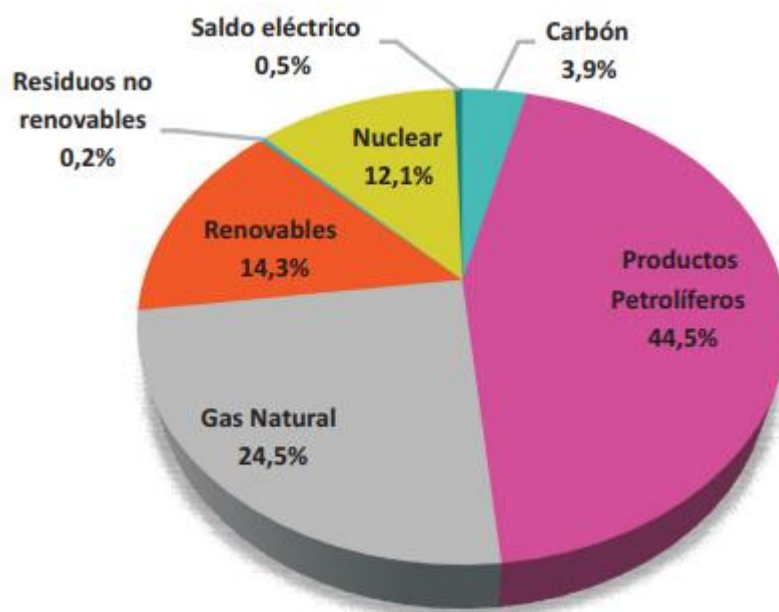


Figura 1-2 Desglose de energía primaria [4]

En cuanto a las metas establecidas por el gobierno español para el uso de energías renovables, según el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima [4], el objetivo es alcanzar una tasa de producción de energía renovable del 20 % en 2020, del 30 % en 2030 y del 42 % en 2040. Sin embargo, según el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), España todavía está lejos de alcanzar

estas metas. Además, el gobierno español también ha establecido metas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 20 % para 2020 y en un 40 % para 2030.

En cuanto a la eficiencia energética, España ha mejorado significativamente en los últimos años. Según el informe de la Agencia Internacional de la Energía (AIE), en 2018, España ocupaba el puesto 12 en un ranking de 28 países de la Unión Europea en términos de eficiencia energética, mejorando su posición en comparación con el año anterior. Sin embargo, todavía hay mucho por hacer en comparación con otros países europeos, como Alemania o Dinamarca, que ocupan los primeros puestos en el ranking de eficiencia energética de la AIE. Además, esta Agencia prevé un incremento del consumo energético prolongándose hasta el año 2040. Por eso, propone medidas enfocadas a la búsqueda de la eficiencia energética en el ámbito de la construcción tratando de hacer frente a ese crecimiento desmesurado del consumo energético. En lo referido a construcción se hace mención a todo tipo de edificaciones (urbano o industrial) tratando siempre de reducir el consumo energético al máximo [5].

En este ámbito, España ha hecho progresos significativos en la eficiencia energética de los edificios. Según el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, en 2018, el parque de edificios existente en España consumió el 40 % de la energía final del país. En vista a este problema, el gobierno español ha establecido metas ambiciosas para mejorar la eficiencia energética de los edificios, como reducir el consumo energético de los edificios existentes en al menos el 35 % en 2030 y en un al menos un 80 % en 2050. Además, se establece el objetivo de que todos los edificios nuevos construidos a partir de 2021 sean edificios de energía casi nula.

Para alcanzar estas metas, el gobierno español ha implementado varias medidas, como la creación de un certificado de eficiencia energética para los edificios, que debe ser presentado al momento de la venta o alquiler de un edificio, así como incentivos y programas para la mejora de la eficiencia energética en los edificios existentes.

Además, España también ha implementado medidas para fomentar el desarrollo de tecnologías de energías renovables en el sector de la construcción, como la instalación de paneles solares en los edificios y la utilización de materiales de construcción sostenibles tratando de combinarlos con los innovadores aditivos de cambio de fase (Phase Change Materials, PCM) [6].

En resumen, España ha hecho progresos significativos en el uso de energías renovables y en la mejora de la eficiencia energética en los últimos años, pero todavía queda mucho por hacer para alcanzar las metas establecidas y para ponerse al nivel de otros países de la Unión Europea en estos temas. En particular, el sector de la construcción tiene un gran potencial para contribuir a la reducción del consumo de energía no renovable y a la mejora de la eficiencia energética en España. Es importante seguir implementando medidas eficaces y ambiciosas para alcanzar estos objetivos y contribuir al desarrollo sostenible en España.

En este sentido, es importante mencionar la importancia de la certificación energética de los edificios, ya que esto permite a los propietarios y usuarios conocer el consumo de energía de su edificio y tomar medidas para mejorarlo. Además, esta certificación energética también es importante para garantizar que se cumplan los estándares de eficiencia energética establecidos por el gobierno.

Otra medida importante para mejorar la eficiencia energética en edificios es la renovación energética. Ésta consiste en realizar mejoras en el edificio para reducir su consumo de energía, como la mejora del aislamiento térmico y la instalación de sistemas de climatización más eficientes. Además, también ayuda a mejorar la calidad de vida de los usuarios del edificio, ya que puede mejorar la comodidad térmica y reduce los costes de climatización.

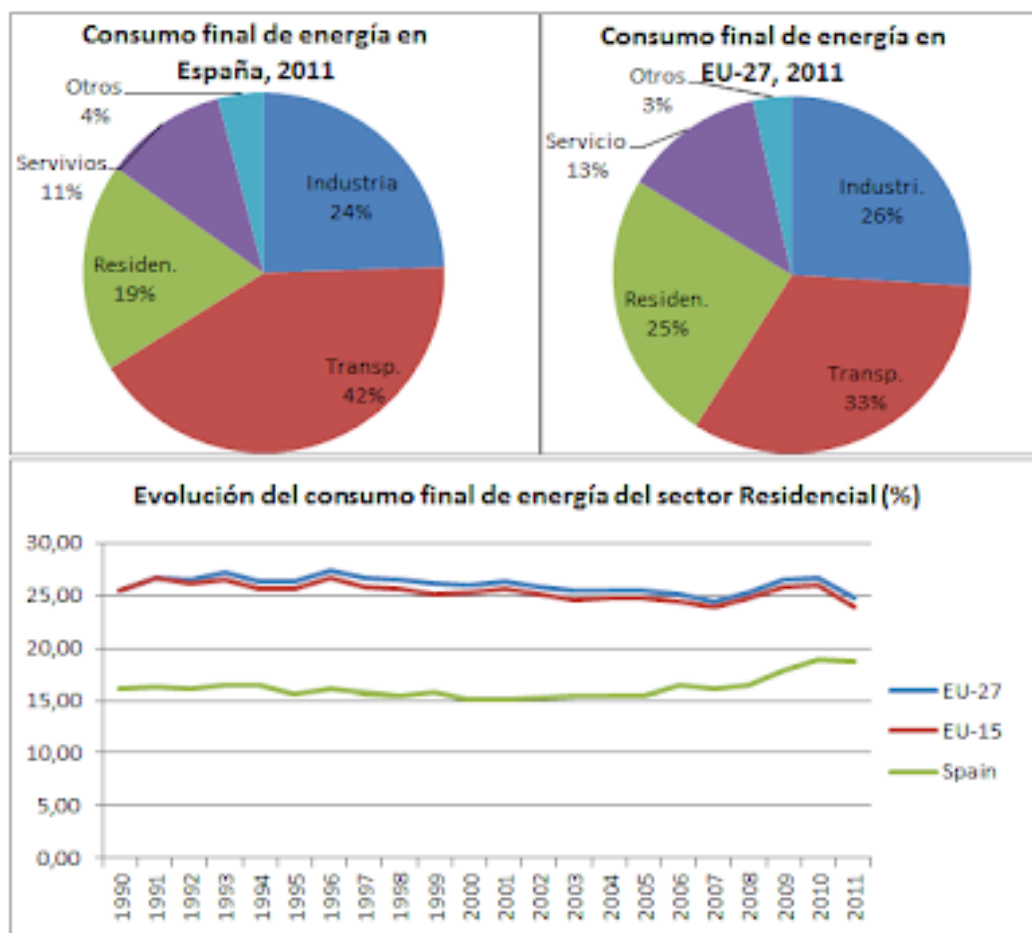


Figura 1-3 Consumo final de energía [7]

En la Figura 1-3 se deduce que, a pesar de que el consumo del sector residencial en España (19 %) está por debajo que el de la UE (25 %), es necesario conseguir disminuir esos niveles de consumo a través de una política de eficiencia energética. Esta eficiencia se puede llevar a cabo abarcando diferentes aspectos de la vivienda como la mejora en aislantes térmicos, sistemas de calefacción e iluminación más barata.

También hay que tener en cuenta el tipo de vivienda al que se esté haciendo referencia pudiendo ser éstas de dos tipos: en bloque o unifamiliares. En la Figura 1-4 queda reflejado cómo el consumo de calefacción se dispara en las viviendas del tipo unifamiliares en comparación con las viviendas en bloque. Además, se comprueba que el uso de aire acondicionado también es uno de los grandes disparadores del consumo energético residencial. Por lo tanto, observando que el mayor gasto se produce en calefacciones y aire acondicionado, una buena manera de paliar este problema sería mejorar los envolventes de los edificios mejorando así la estabilidad térmica disminuyendo el uso de calefacción y de aire acondicionado en verano.

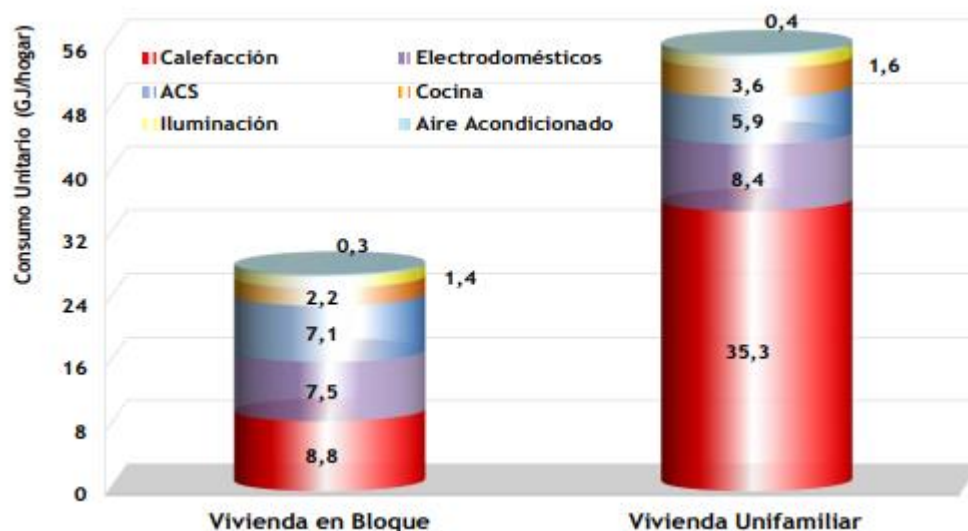


Figura 1-4 Consumo energético unitario según el tipo de vivienda [54]

Para reducir el consumo energético se emplean materiales denominados de cambio de fase, que pueden almacenar gran cantidad de energía al cambiar de estado. Este trabajo se basa en el estudio de la aplicación de materiales de cambio de fase a materiales de construcción (morteros en este caso) para conseguir una mayor estabilidad térmica. La gran ventaja que nos aportan los PCM es que es capaz de almacenar grandes cantidades de energía a temperatura confort (21-23 °C) mediante el cambio de fase, en forma de calor latente.

1.2 Motivación

La Armada cuenta con numerosos arsenales ubicados en grandes edificaciones antiguas que han sido notablemente afectadas por las condiciones climatológicas y particularmente en zonas costeras. La idea de este trabajo es explorar la investigación sobre las ventajas que puede aportar la aditivación de PCM a los morteros con los que se construyen o restauran estas edificaciones de tal manera que se aporten soluciones a éste problema.

El deterioro que sufren estos morteros con el paso del tiempo, siendo afectados por agentes externos, son prueba de la gran motivación que tiene esta investigación. La aditivación de este material no sólo va a permitir mejorar la eficiencia energética de los edificios evitando el choque térmico sino que también va a contribuir a una mayor resistencia de estas instalaciones frente a estos agentes externos.

Todo esto, sin duda, permitirá un gran ahorro económico a la Armada.

1.3 Objetivos

Entre los grandes objetivos de este trabajo encontramos, principalmente, la determinación del mejor tipo de mortero para cada ensayo al que será sometido. Hay ciertos ensayos en los que directamente no se da la posibilidad de determinar cuál es el que presenta un mejor comportamiento debido a que ninguno es apto.

Transmitir los resultados y demostrar que los PCM pueden llegar a cubrir un papel necesario dentro de la industria de la construcción sigue la línea de los objetivos a lograr.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Almacenamiento de energía térmica

2.1.1 Generalidades

Actualmente el mundo se encuentra viviendo una crisis energética que está haciendo incrementar el precio de la energía considerablemente. A esto hay que añadirle la creciente demanda de energía en la sociedad. Como consecuencia de ello, y como bien refleja el objetivo número 7 de la ONU en su agenda de desarrollo sostenible [8], es necesario emprender la búsqueda del camino de la eficiencia energética. En este camino uno de los métodos que catapultan este objetivo es el almacenamiento de energía térmica.

Debido a la intermitencia en la disponibilidad y la constante variación en la radiación solar, el almacenamiento térmico de energía (TES, siglas en inglés) ha encontrado su lugar en los sistemas termodinámicos. El almacenamiento de energía térmica no sólo reduce la discrepancia entre la demanda y el suministro al conservar energía, sino que también mejora el rendimiento y la fiabilidad térmica del sistema. Por lo tanto, diseñar sistemas TES eficientes y económicos es de alta importancia [9].

Estos sistemas TES son frecuentemente utilizados en procesos industriales y de edificación: temas muy ligados con este proyecto. Es fundamental hacer uso del almacenamiento de energía en estos ámbitos debido a las grandes fluctuaciones que se pueden dar teniendo en cuenta que la demanda energética es continua. En la Figura 2-1 se puede observar esquemáticamente el tipo de almacenamiento de energía que se puede dar según el material.

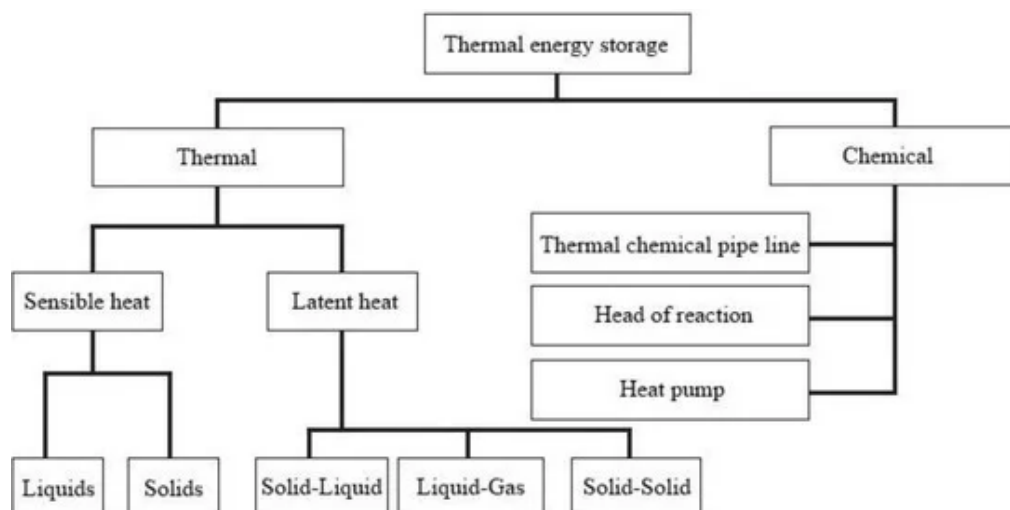


Figura 2-1 Almacenamiento de la energía [10]

Capacidad, potencia y tiempo de descarga están estrechamente relacionados. En ciertos sistemas de almacenamiento, la capacidad y la potencia pueden afectarse mutuamente. Se prefiere que los sistemas de almacenamiento tengan alta densidad de energía y capacidad de potencia para cargar y descargar. Se conocen tres métodos para el almacenamiento térmico a temperaturas que varían de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a más de $400\text{ }^{\circ}\text{C}$: calor sensible, calor latente asociado con materiales cambiantes de fase y almacenamiento térmico-químico asociado con reacciones químicas [9].

2.1.2 Almacenamiento en forma de calor sensible (SHS)

Este tipo de almacenamiento de energía consiste en el cambio de temperatura partiendo de un medio en estado sólido o líquido para almacenar la energía térmica. El calor que se almacene estará directamente relacionado con el calor específico, la densidad, el volumen y la variación de temperatura del material en el que se da este almacenamiento de energía [11].

Es necesario destacar que en este tipo de almacenamiento de energía se da un cambio de temperatura pero sin llegar a realizarse el cambio de fase.

Además, hay que tener en cuenta que es necesario que se den ciertos parámetros y condiciones en el medio de almacenamiento para que se pueda cumplir con el gran objetivo: satisfacer la demanda energética. Entre estos requisitos se encuentran que no sea tóxico, no corrosivo, no inflamable, que mantenga su estructura, facilidad de manejo, bajo impacto ambiental, mantener eficiencia en ciclos y tener un bajo coeficiente de expansión.

2.1.3 Almacenamiento en forma de calor latente (LHS)

El calor latente se refiere a la cantidad de energía necesaria para cambiar la forma física de una sustancia, desde sólida a líquida y de líquida a gaseosa. Esto requiere una modificación en su estructura molecular. La cantidad de energía requerida varía dependiendo del material. El calor latente es una forma de almacenamiento de energía con una densidad de almacenamiento mucho mayor que el calor sensible. Durante el cambio de fase, la temperatura se mantiene constante mientras la cantidad de energía aumenta. Los materiales más utilizados para este tipo de almacenamiento se llaman materiales de cambio de fase (PCM) los cuales aportan que durante su transformación en la estructura molecular la temperatura se mantenga constante [12].

El almacenamiento o liberación de energía cumple con la siguiente ecuación:

$$Q = m \times \Delta h_f$$

Donde:

- Q: Calor almacenado o liberado (J)
- m: Masa (kg)
- Δh_f : Entalpía o calor latente del cambio de fase (J/kg)

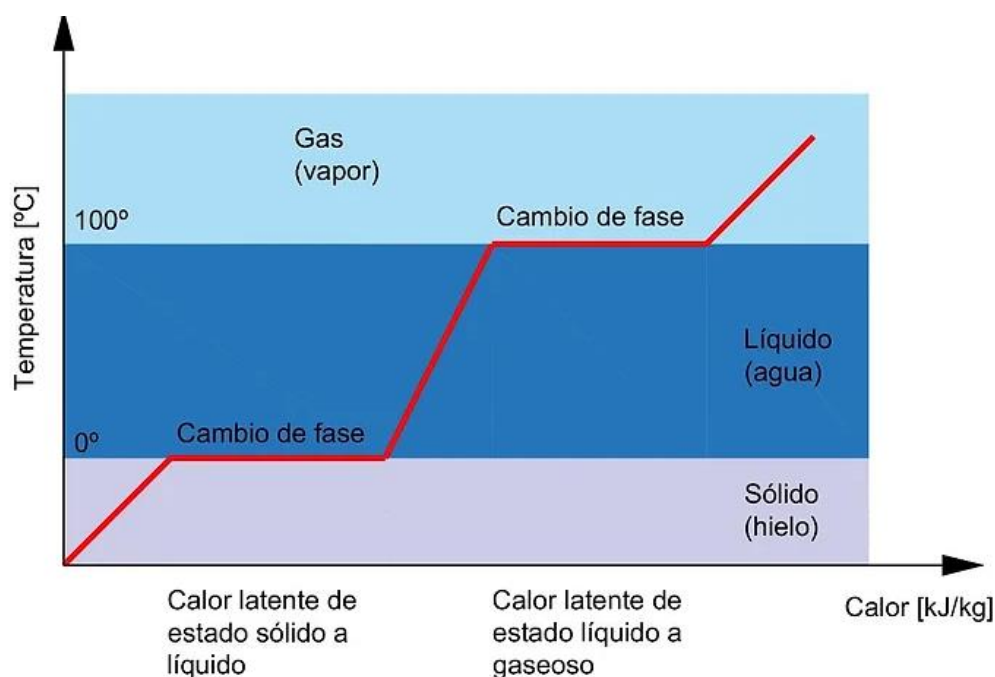


Figura 2-2 PCM en la zona de calor latente [13]

Como podemos ver en la Figura 2-2, el PCM actúa en la zona de calor latente provocando la gran diferencia con respecto a otros métodos de almacenamiento de energía. Esta forma de almacenamiento de energía presenta ciertas ventajas y desventajas frente al método mencionado anteriormente:

Ventajas	Desventajas
Gran densidad de almacenamiento	Cantidad de Q extraída limitada
Selección de la T^a de trabajo	Mayor tiempo de carga y descarga
Cambio de fase a T^a constante	Baja conductividad térmica
Reducción de pérdidas energéticas	
Mayor energía acumulada	

Tabla 2-1 Ventajas y desventajas almacenamiento energía en forma de calor latente [14]

Existen 3 tipos de cambios de fase: sólido-sólido (cambio en la estructura cristalina), sólido-líquido y líquido-gas. El cambio de fase líquido-gas tiene una alta densidad de energía, pero el aumento en el volumen del material lo hace poco útil para el almacenamiento de energía térmica. El cambio de fase sólido-líquido, aunque con menor densidad de energía, es el más utilizado para el almacenamiento de energía térmica debido a su alto calor latente y la ausencia de problemas de control de presión por aumento de volumen [15]. Los átomos en la fase líquida tienen más energía que en la fase sólida, por lo que para que un sólido se convierta en líquido, debe adquirir energía para superar las fuerzas de cohesión. Este tipo de energía se llama calor latente de fusión y representa la diferencia de energía entre las fases sólida y líquida [14]. Para solidificar un líquido, se debe liberar este calor latente.

2.2 Morteros

2.2.1 Generalidades

Con el fin de comenzar a analizar bien lo que es un mortero y cuales son las ventajosas cualidades que nos aportan, es necesario poner en contexto el desarrollo que éstos han tenido.

A lo largo de los años, se han utilizado muchos tipos de materiales en morteros de mampostería y la tecnología ha evolucionado gradualmente desde el mortero de un solo componente de la antigüedad hasta versiones híbridas que contienen varios ingredientes. A partir del 2450 aC, se utilizó la cal como mortero de mampostería en Europa. En la época romana, se añadió a la mezcla de mortero de cal, ceniza volcánica molido, polvo de ladrillo y trozos de cerámica, lo que mejoró en gran medida su rendimiento. Debido a sus propiedades superiores, el uso de este mortero hidráulico (es decir, capaz de ajustarse bajo el agua) se extendió y se adoptó en toda Europa y Asia occidental. Quizás debido a la ausencia de materiales naturales como la ceniza volcánica, la tecnología del mortero hidráulico no se desarrolló en la antigua China. Sin embargo, se desarrolló un material de construcción compuesto inorgánico-orgánico especial, el mortero de arroz glutinoso-cal. Esta tecnología se utilizó ampliamente en edificios importantes, como tumbas, en construcciones urbanas e incluso en instalaciones de conservación de agua. Puede ser la primera tecnología de mortero compuesto inorgánico-orgánico extendida en China, o incluso en el mundo. [16]

La reparación o reemplazo del mortero de mampostería es necesario en la restauración de construcciones históricas, pero la selección de un mortero adecuado a menudo es problemática. Una elección inadecuada puede llevar al fracaso de la obra de restauración y, quizás, incluso a más daños. Por lo tanto, una comprensión exhaustiva de la tecnología original del mortero y la fabricación de materiales de reemplazo adecuados son objetivos importantes de investigación.

En la actualidad, los morteros de cemento han reemplazado a los antiguos morteros tradicionales, lo que ha llevado a la cal a un papel secundario en la construcción. El mortero, hoy en día, es una mezcla de material aglomerante inorgánico, como la cal, el cemento o el yeso, mezclado con arena y agua en proporciones variables. Es utilizado como elemento de unión para diferentes materiales de construcción como bloques, ladrillos o piedras, y también para revestir paredes interiores o exteriores. Esto es posible gracias a sus propiedades, como su durabilidad, seguridad y resistencia a compresión y fuego siempre que no se altere su composición [17]. Los morteros pueden ser de diferentes tipos según el conglomerante que se añada. En este trabajo se realiza el estudio de dos tipos de morteros: cal y cemento.

2.2.2 Componentes de los morteros

2.2.2.1 Aglomerantes

Los aglomerantes son un componente esencial en los morteros y tienen como objetivo principal asegurar una adecuada unión entre los distintos elementos estructurales que conforman una edificación o construcción. Para cumplir con este objetivo, es importante que los aglomerantes estén formados por partículas extremadamente finas y sean más reactivos químicamente que los demás elementos. En el contexto de la construcción, algunos de los aglomerantes más comunes incluyen cemento, cal y yeso.

En el presente trabajo profundizaremos más en los aglomerantes de cal y cemento.

- **Cal**

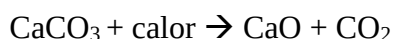
El uso de la cal como material para unir piedras y ladrillos en la construcción ha sido una práctica común desde la antigüedad. Durante siglos, se utilizó como el material de unión principal en la construcción de edificios en la región del Mediterráneo. La calidad de estos morteros ha sido demostrada a lo largo de la historia, como en la construcción de las bóvedas de las catedrales, que siguen en pie después de siglos. La cal también se utilizó en el pasado para mantener una atmósfera salubre durante

plagas y epidemias. Sin embargo, con la popularidad del cemento y el cambio en la construcción de estructuras, el uso de la cal disminuyó. Ahora, con el resurgimiento de la bioconstrucción, el uso de la cal está aumentando de nuevo, y se utiliza en diversos aspectos de la construcción, especialmente en la restauración del patrimonio histórico debido a su menor agresividad con los materiales existentes.

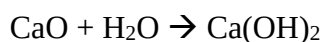
La cal utilizada en construcción está clasificada según su composición química, de acuerdo a la normativa europea UNE_EN 459-1. Existen dos tipos principales de cal para construcción: cal aérea y cal hidráulica. Sin embargo, en este estudio solo se profundizará en la cal hidratada, que será el tipo utilizado en los ensayos que se investigan.

Con el fin de entender mejor qué es la cal, antes de entrar en profundidad con la cal hidratada, a continuación se explica el ciclo de elaboración al que se somete:

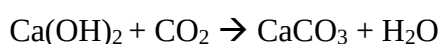
1. **Calcinación:** El proceso de producción de cal comienza con la cocción a alta temperatura (900 °C) de la piedra caliza. Esto resulta en la disociación del carbonato cálcico (CaCO_3) en óxido de calcio (CaO) y dióxido de carbono (CO_2). La cal viva es el resultado de esta reacción y se presenta como fragmentos irregulares. Al agregar agua (H_2O), la cal viva se hidrata y reacciona exotérmicamente, transformándose en una pasta o polvo blanco dependiendo de la cantidad de agua añadida.



2. **Apagado:** La cal viva (CaO) se convierte en hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) cuando se mezcla con agua (H_2O). Si se agrega poca cantidad de agua, solo la mitad del peso de la cal se hidratará y se obtendrá un polvo seco. Sin embargo, si se agrega una cantidad abundante de agua, se obtendrá una pasta de cal que puede ser almacenada en balsas durante al menos seis meses. Con el tiempo, esta pasta de cal experimenta un proceso de micro cristalización, pasando de cristales grandes a cristales más pequeños. Con mayor antigüedad, la pasta de cal adquiere una mayor extensión superficial, mayor elasticidad y plasticidad, y una mejor adherencia, lo que resulta en una mayor resistencia inicial, ya que la carbonatación es más rápida.



3. **Pasta de mortero:** La pasta de cal se utiliza junto con arena y agua como un adhesivo para unir piedras y ladrillos entre sí. Este material, conocido como argamasa, también se utiliza para crear una capa de mortero en un muro para protegerlo de los elementos climáticos y para proporcionar una superficie plana. La pasta de cal, arena y agua se aplican sobre el muro en una capa llamada enfoscado, que es una capa de protección exterior que también sirve como base para el revoco o estuco, una superficie de protección adicional. En resumen, la pasta de cal se utiliza como parte de un proceso para proteger y mejorar la apariencia de un muro, brindándole resistencia y durabilidad.
4. **Carbonatación:** Con el tiempo, el mortero de cal se transforma a través de un proceso conocido como carbonatación, en el cual reacciona con el dióxido de carbono (CO_2) presente en la atmósfera. Este proceso se produce desde la superficie hacia el interior del mortero, y conserva un núcleo húmedo que le brinda sus propiedades y elasticidad. Gracias a esta flexibilidad, el mortero se comporta de manera más flexible y se convierte en una capa sólida de carbonato cálcico, similar a la piedra original, pero con menos impurezas. La reacción química que describe este proceso es la siguiente:



En la Figura 2-3 se muestra el ciclo que sigue la cal:



Figura 2-3 Ciclo de la cal [18]

Dependiendo del ámbito de aplicación de la cal encontramos diferentes tipos los cuales vemos esquemáticamente representados en la Figura 2-4 profundizando más en aquellos que nos atañen: la construcción.



Figura 2-4 Industrias de aplicación de la cal [18]

Como ya se ha mencionado anteriormente, el estudio de la cal, en este trabajo, será sobre la cal hidratada. Para entender mejor este tipo de cal primero hay que explicar aquellas que la engloban y la diferencia que hay entre la cal viva y la hidratada. En cuanto a la diferencia que hay con la cal viva es, principalmente, que la cal hidratada se obtiene a partir del apagado de la cal viva.

Siguiendo la Figura 2-4 encontramos los tipos de cales que engloban a la cal hidratada. Estas son las siguientes:

- Cales aéreas: Estas cales son aquellas que principalmente están constituidas por óxido o hidróxido de calcio. El proceso de endurecer lo realiza al aire libre lentamente bajo el efecto del dióxido de carbono. No suelen endurecerse bajo el agua ya que no poseen propiedades como las que tienen las cales hidráulicas.
 - Cales cálcicas: Estas cales tienen unas grandes propiedades entre las que podemos destacar la neutralización de procesos debido a su elevado nivel de PH, captación de fósforo y azufre, depresión del magnesio y, además, apota calor durante su reacción con agua. Estas cales nacen a partir de la calcinación de mineral de Carbonato de Calcio (Ca CO_3).
 - Cal dolomítica: La cal dolomítica es un compuesto químico que se compone principalmente de calcio y magnesio, y se utiliza comúnmente en la agricultura para corregir la acidez del suelo. La fórmula química de la cal dolomítica es $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, lo que indica que contiene iones de calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}) y carbonato (CO_3^{2-}). La presencia de magnesio en la cal dolomítica le proporciona beneficios adicionales a las plantas en comparación con la caliza pura que solo contiene calcio [19].

- **Cemento**

Este tipo de adhesivo es similar a los anteriores y ha sido utilizado por mucho tiempo, incluso desde la antigua Grecia y Roma. Hoy en día, se considera una mezcla de caliza y arcilla calcinadas a altas temperaturas para convertirse en cal viva. Cuando se combina químicamente con la arcilla, se llama Clinker (el componente principal del cemento). Se fabrica a partir de un polvo mezclado y fortificado con aditivos conocido como crudo, que se somete a altas temperaturas en un horno.

El cemento está compuesto por varios elementos clave, incluido el componente principal de caliza, que se utiliza debido a su alto contenido en el material crudo en rocas carbonáticas con una gran riqueza, aproximadamente del 75 %. También hay compuestos secundarios, conocidos como correctores, que tienen un bajo contenido en el crudo y aportan componentes químicos adicionales necesarios para producir un crudo de calidad adecuada. Por último, el yeso y la anhidrita son el regulador de fraguado y también forman parte del cemento [20], [21].

Los tipos de cemento incluyen: [22]

- El cemento Portland blanco, que es un tipo de cemento puro y de color claro utilizado en la construcción de edificios y estructuras que requieren un acabado uniforme y brillante.
- El cemento de albañilería es un tipo de cemento más grueso y de color gris utilizado para construir mampostería y otros trabajos de construcción con bloques y ladrillos.
- Los cementos aluminosos son un tipo de cemento con un alto contenido de aluminato de calcio que se utiliza en aplicaciones de construcción que requieren una alta resistencia a la corrosión y a la oxidación.
- Los cementos puzolánicos son un tipo de cemento que se produce agregando materiales puzolánicos como escorias de alto horno o ceniza volante a la mezcla de cemento. Estos materiales agregados mejoran la resistencia y la durabilidad del cemento.
- Por último, los cementos resistentes a sulfatos son un tipo de cemento especialmente diseñado para resistir la acción de sulfatos presentes en el suelo y el agua, lo que lo hace ideal para aplicaciones en entornos con altos niveles de sulfatos, como los que se dan en zonas cercanas a la mar.

2.2.2.2 Áridos

Los áridos (arena o rocas fragmentadas) ocupan un lugar fundamental en el sector básico de la minería española y mundial. Gracias a éstos es posible la construcción de todo tipo de edificaciones, calles, carreteras, aeropuertos, etc. Coloquialmente, los áridos, son aquellos conocidos como grava, arena y gravilla.

Estos materiales deben cumplir con ciertas características según el uso al que estén destinados. Estas características pueden ser de naturaleza petrográfica o el resultado de un proceso de producción específico. Los áridos poseen ciertas propiedades que recogen diferentes parámetros que deben cumplir estos elementos para cumplir correctamente con su función. Las propiedades son las citadas: [23]

- Las propiedades geométricas incluyen el tamaño, la forma y la textura de las partículas, como su alargamiento o la presencia de caras de fractura. También se considera la calidad de los finos. Las formas más convenientes son las rugosas y de carácter angular ya que se da una mejor adhesión con la pasta.
- Las propiedades mecánicas y físicas incluyen la resistencia al desgaste, la fragilidad, la densidad, la porosidad, el contenido de agua y otros aspectos que afectan su capacidad para ser utilizados en la construcción. Por ejemplo, la resistencia al desgaste es importante para que los automóviles no deslicen en las carreteras.
- Las propiedades térmicas y de alteración incluyen la resistencia a los ciclos de congelación y descongelación, y su capacidad para resistir la degradación en condiciones climatológicas adversas.
- Las propiedades químicas incluyen el contenido en azufre, cloruros, materia orgánica, contaminantes ligeros, reactividad potencial y otros aspectos que pueden afectar su integridad y seguridad en la construcción. Es importante asegurarse de que los áridos cumplan con estos estándares para garantizar la durabilidad y la seguridad de las estructuras construidas con ellos.
- Adherencia pasta-árido: Las uniones entre dos materiales en la construcción pueden verse significativamente alteradas y modificadas debido a la naturaleza, forma, textura y composición química del árido utilizado en la elaboración de los morteros. Esto se debe a las reacciones químicas que tienen lugar durante el proceso de carbonatación de los morteros, en el cual se produce la formación de carbonato de calcio. Es importante tener en cuenta que la carbonatación puede afectar la durabilidad y la resistencia de los morteros y, por lo tanto, es fundamental utilizar áridos de alta calidad y controlar el proceso de carbonatación para garantizar una construcción duradera y segura.

Con el fin de establecer un control sobre los áridos, estas propiedades son evaluadas por parte de más de 50 normas de ensayo comunes a los países de la Unión Europea.

- ***Clasificación de los áridos***

Hay tres maneras de clasificar los áridos: según el tipo de roca del que proceden, la aplicación que van a tener y el tamaño de éstos.

- ***Según el tipo de roca***

En la Tabla 2-2 se muestran los distintos áridos que hay atendiendo al tipo de roca de la que se obtienen.

Áridos naturales			Áridos reciclados	Áridos secundarios (artificiales)
Rocas ígneas	Rocas sedimentarias	Rocas metamórficas	Ladrillos Hormigones Tejas Carreteras	Escorias de horno alto Escorias de acería Otras scorias
Plutónicas	Calcáreas	Gneises		
Granitos	Calizas	Cuarcitas		
Dioritas	Dolomías	Mármoles		
Grabos				
Hipobisales	Arenosas			
Diabasas	Arenas			
Pórfidos	Areniscas			
Volcánicas	Arenas silíceas			
Basaltos	Gravas			
Traquitas	Conglomerados			
Riolitas	Grauvacas			
Andesitas				

Tabla 2-2 Clasificación según el tipo de roca [24]

Los áridos naturales son los obtenidos de la corteza terrestre y suponen el 99 % del total del consumo. La manera de obtenerlos es mediante yacimientos detríticos no consolidados en explotaciones que se denominan graveras o triturando rocas como el granito, calizas, diorita, cuarcitas [25].

○ Según su aplicación

En la Tabla 2-3 se recogen los tipos de áridos que se encuentra según la aplicación que se les den.

Construcción	Industria
Áridos para hormigón	
Áridos para morteros	
Áridos para capas de rodadura (carreteras)	
Áridos para bases y subbases (carreteras)	Áridos industriales
Áridos para escolleras (puertos)	
Áridos ligeros	

Tabla 2-3 Tipos de áridos según su aplicación [24]

○ Según su tamaño

Los materiales gruesos como los áridos se identifican por su tamaño, que se mide mediante su tamaño mínimo y máximo en relación a la fracción granulométrica d/D. Por ejemplo, un árido con un

tamaño comprendido entre 6 y 12 milímetros se conocería como árido 6/12 milímetros. Esta forma de medir el tamaño de los áridos es importante porque permite establecer su uso apropiado en diferentes aplicaciones, como en la construcción o en la fabricación de productos. [25]

2.2.2.3 Aditivos

De acuerdo con la norma UNE-83-200-84, los aditivos son sustancias que cambian las propiedades o el comportamiento de los morteros, hormigón o pasta frescos o curados, a los que se han añadido. La utilización de aditivos ha sido una práctica antigua, con raíces en la época romana, donde se descubrió su capacidad para endurecerse y mejorar la resistencia y durabilidad cuando se mojaba o se exponía a la humedad. Actualmente, los aditivos se emplean para mejorar diversos aspectos en respuesta a las necesidades del cliente y producir el resultado deseado.

Podemos distinguir tres grandes familias de aditivos según su procedencia:

- Los aditivos inertes o no activos que aportan características como la adherencia o la plasticidad entre otras sin afectar a cualidades básicas del material como puede ser el fraguado.
- Los aditivos activos son materiales, ya sean naturales o artificiales, que proporcionan propiedades hidráulicas, es decir, se endurecen al entrar en contacto con agua o humedad, y propiedades puzolánicas, lo que les permite formar una cantidad específica de hidróxido cálcico a temperatura ambiente cuando están en presencia de agua, resultando en productos sólidos y con una gran resistencia a esfuerzos mecánicos [26], [27]
- Los aditivos sintéticos son aquellos que son fabricados por el ser humano a partir de productos químicos sintéticos. También existen aditivos que son de origen natural, pero que han sido modificados por el ser humano, como es el caso de las resinas. Estas resinas son materiales naturales obtenidos de fuentes como la madera o los productos de la resina de árboles, que se modifican mediante procesos químicos para obtener un producto con una estructura y propiedades específicas. Los aditivos sintéticos y modificados se utilizan en una amplia variedad de productos, desde productos de construcción hasta productos alimentarios, con el objetivo de mejorar sus propiedades y características. Es importante tener en cuenta que, aunque estos aditivos pueden proporcionar una serie de ventajas, también pueden tener efectos secundarios y potenciales riesgos para la salud y el medio ambiente, por lo que es necesario evaluarlos cuidadosamente antes de su uso.

2.2.2.4 Agua

El agua es un componente clave en la elaboración de morteros y hormigones, y su calidad es esencial para garantizar la eficacia y la durabilidad del producto final. Antes de utilizarse, el agua debe ser analizada y debe cumplir una serie de parámetros específicos, incluyendo el pH, la cantidad de sustancias disueltas, cloruros, sulfatos, hidratos de carbono, aceites y grasas. Es importante asegurarse de que el agua esté libre de partículas contaminantes y cumpla con estos parámetros para garantizar la calidad y la eficacia del mortero u hormigón. Además, el uso de agua de baja calidad puede aumentar el riesgo de fallos estructurales, la formación de moho y hongos, y la reducción de la resistencia mecánica. Por lo tanto, es esencial tener en cuenta la calidad del agua en la elaboración de morteros y hormigones.

2.2.3 Mortero de cal

Los tipos de morteros de cal se clasifican según el conglomerante que se le añade. La proporción de los conglomerantes y su composición es una forma de denominarlos. La otra manera de clasificarlos es

según su resistencia a compresión la cual queda establecida a los 28 días de su fabricación: esta característica especificada está recogida en la norma UNE EN 998-2. [28]

En la Tabla 2-4 se puede observar la clasificación de los morteros de cal:

Conglomerante	Composición (ejemplos)	Resistencia
Morteros de cal hidráulica	Cal:arena (1:3)	
Morteros de cal aérea	Cal:arena (1:3)	M-5 (5 N/mm ² a 28 días)
Morteros mixtos (cemento y cal hidráulica)	Cemento:cal:arena (1:1:3)	M-20 (20 N/mm ² a 28 días)
Morteros mixtos (cemento y cal aérea)	Cemento:cal:arena (1:1:3)	

Tabla 2-4 Tipos de morteros de cal [28]

○ **Ventajas**

Los morteros con cal presentan muchas ventajas y características únicas, como mejorar la plasticidad y trabajabilidad, aumentar la retención de agua, ser más flexibles y con mayor adherencia, facilitar en el proceso de remasado, tener un curado autógeno con menor retracción y fisuración. La cal es muy versátil y no contiene sales perjudiciales (como el cemento), tiene una elasticidad que previene retracciones, no requiere aditivos adicionales (sólo los áridos necesarios para la textura y pigmentación), lo que hace innecesario el uso de pinturas de acabado.

En la Tabla 2-5 se recogen algunas de sus principales ventajas:

Buen aislamiento acústico y térmico	Volúmen constante bajo humedad variable
No provoca eflorescencias debido a no contener sales solubles	Muy flexibles: no favorece la aparición de grietas
Evita condensaciones: permeable al vapor de agua	Sin retracción
Muy buena plasticidad y trabajabilidad	Fácil de colorear: incrementa la luminosidad del color
No emite gases tóxicos	Fungicida natural
Garantiza el sellado y estucado	No permite la penetración de agua de lluvia

Tabla 2-5 Ventajas de los morteros puros de cal [29]

2.2.4 Mortero de cemento

A continuación, en la Tabla 2-6, podemos observar las principales ventajas e inconvenientes que presentan los morteros de cemento.

Ventajas	Inconvenientes
Elevada dureza	Tiempo de espera para utilizarlo
Baja porosidad	Alta densidad, conductividad térmica y humedades de condensación
Fraguado rápido	Gran dilatación térmica
Elevada resistencia mecánica y módulo elástico	Contiene sales solubles e iones libres

Tabla 2-6 Propiedades de los morteros de cemento [26]

2.3 Materiales de cambio de fase (PCM)

2.3.1 Generalidades

Las aplicaciones de PCM pueden incluir cualquiera de los siguientes campos energéticos: energía solar, recuperación de calor industrial, regulación de pico eléctrico, textiles, atención médica, gas natural licuado, agricultura de invernaderos, edificios y aeroespacial. Expertos de todo el mundo han estudiado la viabilidad de los PCM, sus aplicaciones y su utilización en edificios para fines de calefacción y refrigeración [15].

Durante la década de 1970, se empezó a tener conciencia de la necesidad de utilizar materiales de origen natural para aumentar la eficiencia energética. Estos materiales tienen diferentes usos en construcciones, dependiendo de las necesidades específicas. Se pueden clasificar estos materiales según la temperatura de transición, lo que permite medir su capacidad de almacenar energía por calor latente [30].

La clasificación de estos materiales se puede observar en la Figura 2-5.

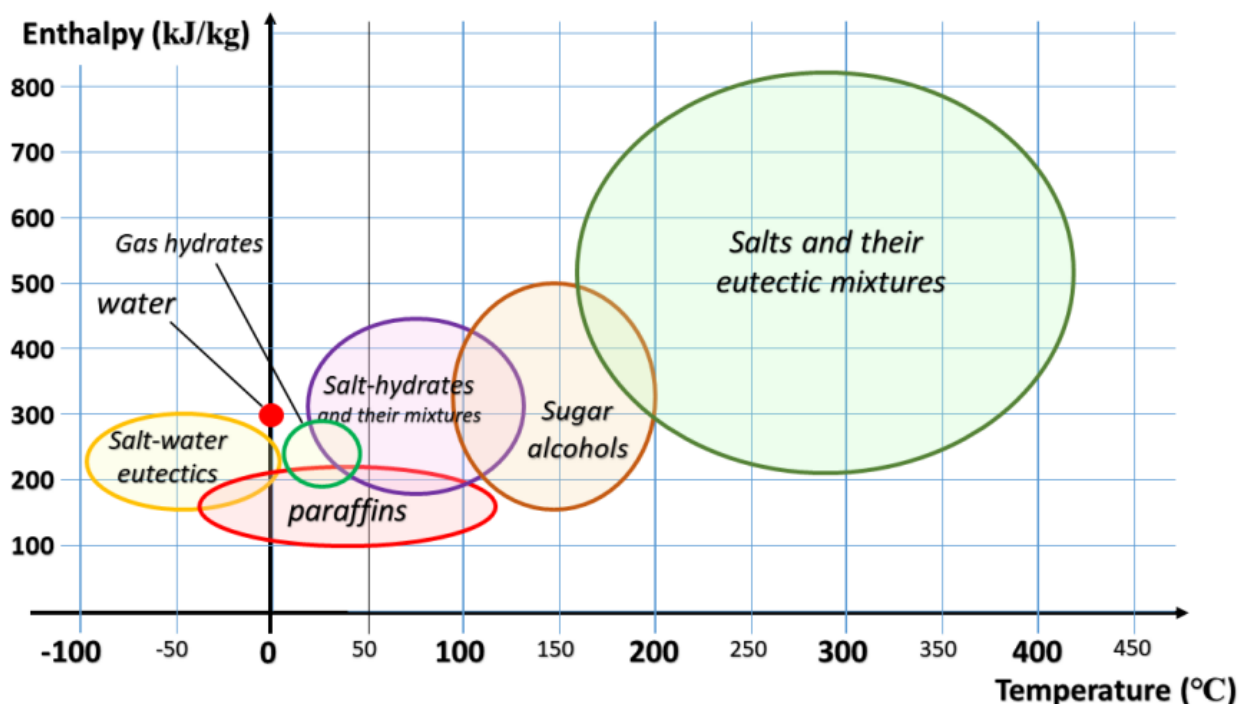


Figura 2-5 Materiales PCM según entalpía y temperatura de fusión [8]

2.3.2 Clasificación de PCM

Sharma y Sagara [31] propusieron una clasificación detallada de los materiales de cambio de fase que se centra en la transformación de fase sólido-líquido. Según esta clasificación, estos materiales se pueden agrupar en cuatro categorías: orgánicos, inorgánicos, eutécticos y mezclas.

- Materiales orgánicos: Estos materiales de cambio de fase están compuestos por compuestos orgánicos, como ésteres, ésteres alquílicos y cetónicos, y tienen un rango de temperatura de transición relativamente bajo.
- Materiales inorgánicos: Estos materiales son compuestos inorgánicos, como sales, nitratos y sulfatos, y tienen una temperatura de transición más elevada en comparación con los materiales orgánicos.
- Materiales eutécticos: Estos materiales son mezclas de dos o más componentes que presentan una temperatura de transición fija y baja, y se utilizan en aplicaciones térmicas.
- Materiales mezclados: Estos materiales son mezclas de dos o más materiales de cambio de fase que se combinan para lograr una temperatura de transición óptima para una aplicación específica.

Es importante destacar que la clasificación de Sharma y Sagara es una herramienta útil para comprender las diferentes propiedades y características de los materiales de cambio de fase, lo que permite elegir el material adecuado para una aplicación en particular. [31]

Esta clasificación mencionada la podemos observar esquemáticamente en la Figura 2-6.

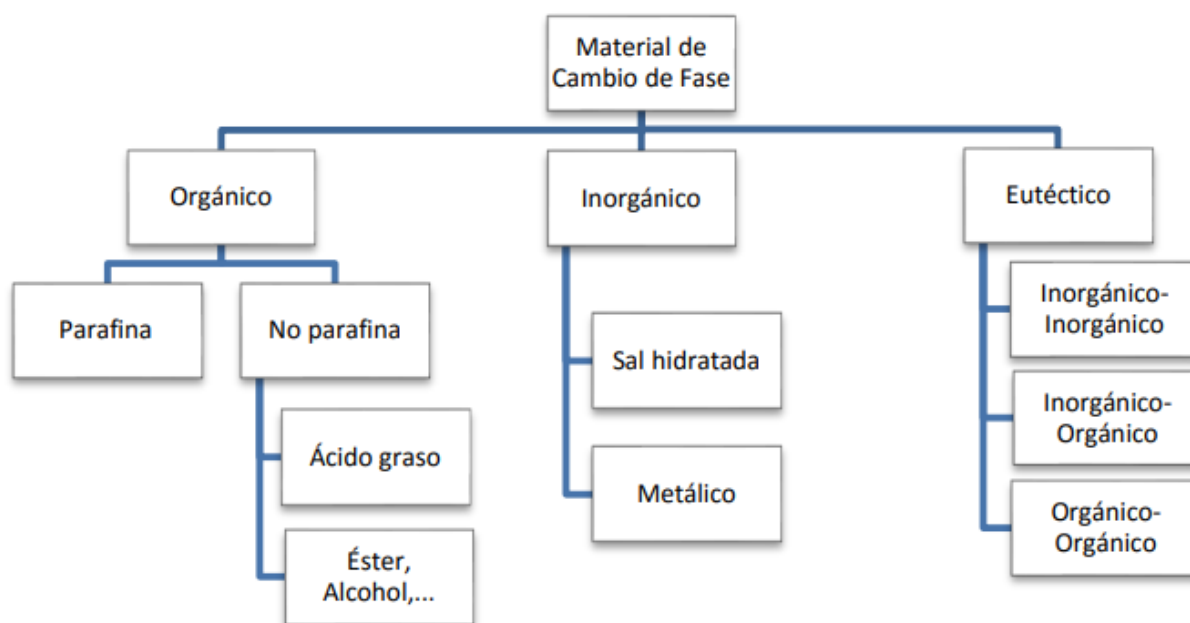


Figura 2-6- Clasificación de los PCM [32]

2.3.2.1 Orgánicos

Los PCM orgánicos son unos materiales muy convenientes para almacenar calor latente gracias a sus particularidades. Estas ventajas se ven aprovechadas en el ámbito de la construcción. Entre los más utilizados encontramos ceras, grasas y sus ésteres [33].

A continuación, en la Tabla 2-7, se muestra una comparativa entre la diferencia de PCM orgánicos e inorgánicos.

Orgánicos	Inorgánicos
Estables química y térmicamente	Alta conductividad térmica
No corrosivos	No inflamable
Sin subenfriamiento	Temperatura de cambio de fase definida
Sin necesidad de agente nucleador para solidificar	Alta densidad de almacenamiento térmico
Fácil uso	Bajo coste económico
Reciclables e inocuos ecológicamente	Biodegradables y reciclable

Tabla 2-7- Comparativa PCM orgánico e inorgánico [34]

Muchos de los problemas asociados con los PCM han sido resueltos o mejorados para aumentar sus cualidades. Por ejemplo, la oxidación, que puede ser un factor de envejecimiento en los PCM, se puede tratar utilizando un oxidante apropiado. Además, otros problemas menores, como las reacciones con productos que contribuyen a la hidratación del concreto, como el hidróxido de calcio, y cambios apreciables en el olor y el volumen, también han sido abordados.

- **Parafinas**

Estos materiales (Figura 2-7) están compuestos por cadenas lineales de hidrocarburos y un alcalino sólido refinado. El punto de fusión de estos materiales está estrechamente relacionado con la cantidad de átomos de carbono presentes en su estructura. En general, se ha establecido que, a medida que aumenta la longitud de la cadena de hidrocarburo, también aumenta la temperatura de fusión.

Los materiales para el almacenamiento de calor latente presentan dos etapas de enfriamiento: un rango estrecho para un corto período de tiempo y un rango amplio para un período más largo. Estas dos etapas se corresponden con la transición de amorfo-sólido a cristalino-sólido y se produce una parte del calor latente de fusión en cada una de estas transiciones. Es importante conocer la diferencia entre la temperatura teórica y la medida experimentalmente para su aplicación en sistemas de almacenamiento de calor latente.

Cuando las parafinas alcanzan su punto de fusión, su estructura cristalina cambia a forma de aguja y se vuelven maleables y suaves. Sin embargo, cuando la temperatura del material se encuentra por debajo de la temperatura de fusión, su estructura vuelve a cambiar y se vuelve dura y frágil con cristales en forma de disco.

Las parafinas tienen una amplia variedad de aplicaciones, como en sistemas de calefacción y refrigeración pasiva en viviendas y otras edificaciones. Las parafinas comerciales y las ceras de parafina son las más comúnmente utilizadas debido a su temperatura de fusión adecuada para estos sistemas [35].



Figura 2-7 Parafina de calor latente [36]

- **Ácidos grasos**

Las grasas térmicas son derivadas de diferentes fuentes incluyendo plantas y animales. Su estabilidad química está determinada por la longitud de la molécula, lo que a su vez influye en su temperatura de fusión. Algunos ejemplos de estos ácidos grasos son el ácido palmítico, cáprico, caprílico y el ácido láurico. Con el tiempo, se han realizado mejoras en sus propiedades químicas para superar las limitaciones, como la producción de ácidos grasos con temperaturas de cambio de fase comprendidas entre 6°C y 70°C. [37]

Estas sustancias tienen propiedades térmicas estables, con puntos de fusión y congelación bien definidos y un amplio rango de temperatura para la refrigeración, lo que previene el subenfriamiento en la mayoría de los casos. Por lo tanto, su uso principal es en interiores. A pesar de sus ventajas, su uso en sistemas de almacenamiento de energía térmica no ha sido viable debido a su elevado coste. [38]

Los PCM orgánicos más comúnmente utilizados actualmente son los bio-PCM. Éstos tienen una capacidad de almacenamiento similar a la de las parafinas y son hidrocarburos hidrogenados químicamente estables, biodegradables y menos propensos a inflamarse. Se obtienen a partir de grasas animales y vegetales que se pueden extraer de diversos productos de la industria agrícola, alimentos o productos de biocombustibles. Estos bio-PCM tienen la capacidad de almacenar y liberar grandes cantidades de energía térmica en un rango de temperatura controlado. Esto los hace ideales para su uso en aplicaciones de climatización y refrigeración, especialmente en sistemas de almacenamiento de energía térmica por calor latente. Además, debido a su baja inflamabilidad, su uso en interiores es seguro y su biodegradabilidad reduce el impacto ambiental. A pesar de su eficacia, como ya se ha mencionado anteriormente, su costo económico puede ser un obstáculo para su aplicación a gran escala. Sin embargo, con la investigación y el desarrollo continuo, se espera que estos bio-PCM sean cada vez más accesibles y ampliamente utilizados en el futuro. [39]

2.3.2.2 Inorgánicos

- **Sales hidratadas**

Las sales hídricas son compuestos formados principalmente por sales que tienen moléculas de agua en su composición. Cuando cristalizan, la sal se une con las moléculas de agua para crear una estructura cristalina. Estos materiales son atractivos por su bajo coste y su capacidad de almacenar calor, lo que los hace ideales para su uso en sistemas de almacenamiento de energía solar. Además, su alta densidad los hace útiles en la construcción, refrigeración y en elementos como aires acondicionados. Sin embargo, estos materiales también tienen algunos inconvenientes, como la corrosión y la inestabilidad, por lo que se investigan para mejorarlos. El sulfato de sodio es la sal más comúnmente utilizada para este propósito.

Para mejorar las propiedades y el rendimiento de las sales hídricas, a menudo se agrega un aditivo. Esto permite lograr un cambio de fase a una temperatura constante, y también permite repetir el ciclo o el proceso durante períodos de tiempo prolongados sin alterar su estructura física o química.

El uso de aditivos en las sales hídricas tiene como objetivo mejorar su capacidad para almacenar y liberar calor de manera eficiente. Al hacerlo, se logra una mejor eficiencia en los sistemas de almacenamiento de energía térmica, lo que a su vez permite un uso más efectivo y rentable de la energía solar.

Además, el uso de aditivos también puede mejorar la estabilidad de las sales hídricas, lo que reduce la tendencia a la corrosión y a la inestabilidad. También puede ayudar a prevenir el subenfriamiento y la dificultad de resolidificación, lo que mejora la eficiencia y la durabilidad de los sistemas de almacenamiento de energía térmica que utilizan sales hídricas. En general, la adición de aditivos a las sales hídricas es un aspecto clave en la investigación y mejora continua de estos materiales [40].

- **Metales**

Los PCMs compuestos por metales puros y aleaciones tienen un peso significativo, lo que limita su uso para algunas funciones. Sin embargo, esta característica resulta ventajosa en aplicaciones que requieren materiales de alta densidad, ya que tienen un calor de fusión elevado por unidad de volumen y conductividades térmicas elevadas [41].

2.3.2.3 Mezclas Eutécticas

Un material eutéctico es una combinación equilibrada de dos o más materiales que experimentan un cambio de fase. Estos materiales tienen una alta estabilidad cuando están en estado líquido, una temperatura de fusión definida y algunas mezclas tienen una mayor capacidad de almacenamiento de energía térmica en comparación con parafinas y sales hidratadas. Además, estos materiales pueden ser fácilmente aplicados en superficies porosas, lo que los hace aptos para una amplia gama de aplicaciones. En resumen, los materiales eutécticos tienen características únicas que los hacen ideales para su uso en una variedad de aplicaciones térmicas [42].

2.3.3 PCM en edificaciones

En la edificación tenemos dos maneras de aplicar los PCM: activa y pasiva.

Activa: En este método de aditivación, los PCM se añaden a los componentes energéticos en la construcción, es decir, aquellos que requieren energía para funcionar, como los sistemas de climatización o calefacción, los tanques de almacenamiento de agua caliente, paneles solares, entre otros. En estos casos, la energía térmica se guarda de forma independiente a la estructura del edificio. Los sistemas de almacenamiento de energía térmica a través de calor latente o TES (siglas en inglés), utilizan esa energía según la demanda o para lograr un equilibrio energético entre lo que se necesita en el edificio y lo que se suministra.

Pasiva: En los componentes pasivos de la construcción, se busca una temperatura y un confort óptimos sin necesidad de una fuente externa de energía. La energía térmica se almacena y se libera automáticamente cuando la temperatura interior o exterior no coincide con la temperatura umbral o de fusión del material de cambio de fase. Esto se puede lograr mediante la aplicación en muros o paredes compuestos por diferentes materiales. Gracias a su capacidad para acumular y liberar calor a una temperatura constante, se pueden reducir las fluctuaciones de temperatura y lograr una estabilidad y eficiencia energética [43].

2.3.3.1 PCM en materiales de construcción

Para mejorar el confort térmico en los edificios, se pueden almacenar energía en las paredes, techo y suelo mediante la adición de materiales de cambio de fase (Figura 2-8) Figura 2-8 PCM en la construcción. Estos materiales se pueden incorporar de diversas maneras en los materiales de construcción. Las opciones de incorporación son tres:

- Aplicación Directa
- Encapsulado (Microencapsulado o macroencapsulado)
- Inmersión

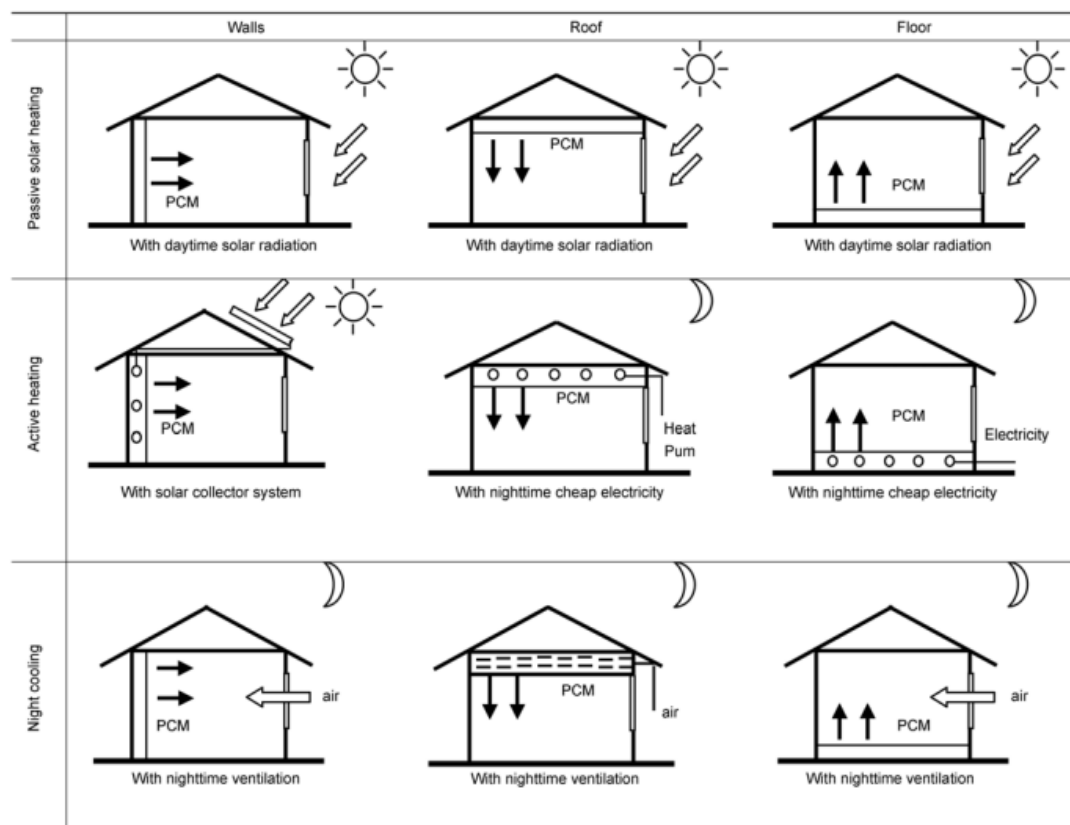


Figura 2-8 PCM en la construcción [44]

- **Aplicación Directa**

En este método para almacenar energía en los edificios, se utilizan los PCM en forma líquida o sólida en granos. Éstos se agregan directamente a los materiales de construcción como un componente adicional en su proceso de fabricación, como es el caso de las placas de yeso o el hormigón.

La resistencia de estos materiales depende de su composición. Por ejemplo, la resistencia de las placas de yeso no disminuye considerablemente si contienen menos del 20 % del peso de material de cambio de fase. Es importante tener en cuenta que la cantidad de PCM añadido puede afectar a la resistencia de los materiales de construcción y es necesario considerar esto al seleccionar la cantidad adecuada.

- **Encapsulado**

Para proteger los materiales de construcción de los efectos negativos de los PCM, es posible encapsularlos antes de utilizarlos. La encapsulación puede hacerse de dos maneras: a nivel macro o micro. En el primer método, los PCM se colocan dentro de pequeños envases como bolsas, esferas, paneles u otros tipos de recipientes antes de ser utilizados. Por ejemplo, se desarrolló un muro que utilizaba parafina altamente cristalina como PCM, lo que redujo el flujo de calor en un 38 %. Sin embargo, la macro-encapsulación requiere una protección adicional contra roturas y es costosa de integrar en materiales de construcción. Además, la transferencia de calor durante el proceso de solidificación disminuye, lo que resulta en una baja tasa de transferencia de calor en estado sólido [45].

La técnica de micro-encapsulación consiste en encerrar pequeñas partículas de PCM en una fina capa polimérica de gran peso molecular, que debe ser compatible tanto con el PCM como con los materiales de construcción. Esta técnica ofrece la ventaja de ser de fácil aplicación, tener una buena tasa de transferencia de calor debido al aumento de superficie de contacto y no requerir protección especial contra rotura. Sin embargo, puede tener un impacto en las propiedades mecánicas de la estructura.

Hawlder investigó cómo diferentes factores afectan las características y el rendimiento de un PCM micro-encapsulado, en términos de eficiencia de encapsulación, almacenamiento de energía y capacidad de liberación de calor. Los resultados sugirieron que la cera de parafina micro-encapsulada es una técnica prometedora para el almacenamiento de energía solar [46]. En la Figura 2-9 podemos observar cómo es el esquema de funcionamiento de PCM micro-encapsulado.

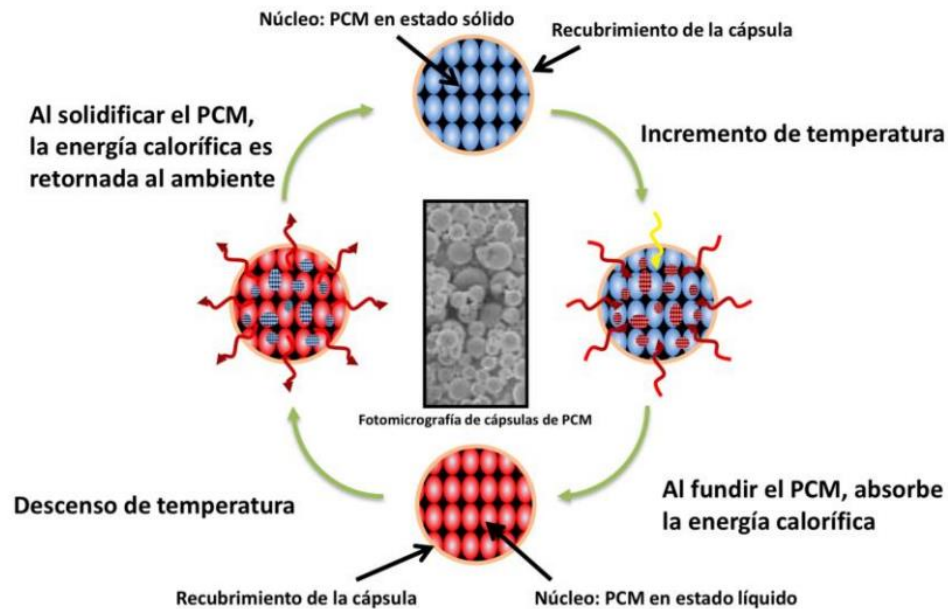


Figura 2-9 Esquema de funcionamiento PCM micro-encapsulado [47]

- **Inmersión**

Este método se enfoca en materiales estructurales porosos como ladrillos, placas de yeso y bloques de hormigón. El proceso consiste en sumergir estos materiales en PCM líquido, permitiéndoles absorberlo y rellenar sus poros mediante capilaridad. Después, se deja enfriar hasta que el PCM se solidifique.

Sin embargo, este proceso puede verse afectado por diferentes factores como la temperatura de fusión, viscosidad y tamaño de los poros. Además, la estructura de algunos materiales puede causar que los materiales de cambio de fase sean obstruidos por la tensión superficial del material principal. En el caso de PCMs como ácidos grasos, es necesario encapsularlos y protegerlos para evitar fugas [48].

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Materiales

3.1.1 Morteros de cal y cemento

Con el fin de poder llevar a cabo la realización de este TFG, se han realizado diferentes muestras de morteros de cal y cemento. Estas muestras serán estudiadas utilizándolas para diferentes ensayos. Para ello, primero se llevó a cabo la realización de los morteros de cal y, días más tarde, los de cemento.

Las muestras de estos morteros son de diferentes medidas y formas (Figura 3-1) que se adecúan para cada ensayo. En su totalidad se han fabricado ocho cubos, dos cilindros y un vaso por cada muestra.

Las medidas de estas muestras 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: $\varnothing_{superior} = 4,81\text{ cm}$; $\varnothing_{inferior} = 6,43\text{ cm}$; $h = 8,25\text{ cm}$

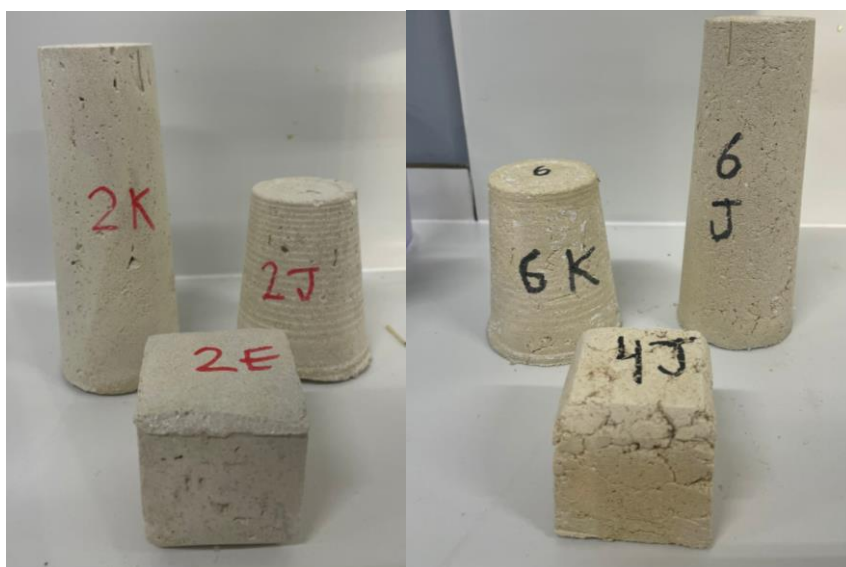


Figura 3-1 Morteros de cal y cemento

3.1.1.1 Morteros de cal

Teniendo en cuenta las grandes ventajas y disponibilidad que tiene la cal hidratada para este tipo de ensayos, se ha empleado para la realización de las diferentes muestras de los morteros de cal. El mortero está, formado por el aglomerante (cal hidratada), el árido y agua.

El aglomerante que se utiliza, hidróxido de calcio CL-90-S, es un producto químico con alto contenido en óxido de calcio (90 %) utilizado en la industria de la construcción como aditivo para mejorar la consistencia y la estabilidad de los morteros y pastas. Este producto se caracteriza por tener una gran capacidad de retener agua, lo que permite obtener una consistencia adecuada para su aplicación en la construcción. Es por ello por lo que, para la realización de los morteros, ha sido empleado tratando de asemejar el estudio lo máximo posible a la realidad.

Se han fabricado once muestras (ocho cubos, dos cilindros y un vaso) por cada tipo de mortero habiendo siete tipos de mortero. Cada tipo se diferencia por el porcentaje de material de cambio de fase (PCM) que lleva incorporado.

En cuanto a la composición de los materiales utilizados para los morteros de cal dependiendo de la muestra (M, numeradas de la 0 a la 6) son los reflejados en la Tabla 3-1:

	M0	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Arena (kg)	2,1925	2,1900	2,1895	2,1925	2,1895	2,1910	2,1920
Cal (kg)	0,7410	0,7380	0,7440	0,7455	0,7440	0,7530	0,7410
Agua (mL)	26,5	26,5	26,5	26,5	26,5	26,5	26,5
PCM RT18	-	-	-	0,0746	0,1488	0,03765	0,0741
PCM RT35	-	0,0738	0,1488	-	-	0,03765	0,0741

Tabla 3-1 Composición de los morteros de cal

3.1.1.2 Morteros de cemento

Para la fabricación de los morteros de cemento, se ha seguido la misma metodología que para los morteros de cal, aunque cambiando los materiales. Esta vez los materiales que se utilizaron fueron los mismos que para el mortero de cal, excepto cemento por cal. Las proporciones de estos elementos aparecen reflejados en la Tabla 3-2.

Para lograr una correcta fabricación de cada muestra se realizó la mezcla tratando de ser lo más homogénea posible. A continuación, se introdujo dicha mezcla en los moldes para, finalmente, tras respetar los días de fraguado del cemento, obtener las muestras finales: 8 cubos, 2 cilindros y 1 vaso por cada muestra.



Figura 3-2 Arena de sílice y 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 3-2 Componentes de los morteros de cemento

3.1.2 PCM

La influencia de los materiales de cambio de fase (PCM) en el comportamiento del mortero es el principal objeto de estudio del proyecto. Entre los disponibles en el mercado se seleccionaron el Rubitherm 35 (RT35) y Rubitherm 18 (RT18), por su potencial aplicabilidad a materiales de construcción. Estos números que especifican el tipo de RT se refieren a la temperatura aproximada de fusión del material de cambio de fase. Por lo tanto, para mezclarlos con el resto de materiales del mortero se hizo de la siguiente manera:

- RT35: Debido a que su temperatura de fusión ronda los 35 °C se encontró este material en estado sólido y fue necesario molerlo en polvo para tener un tamaño pequeño y que se mezclara lo mejor posible con el resto del mortero de cal y cemento.

- RT18: La temperatura de fusión de este material ronda los 18 °C y, por ello, al conservarlo a temperatura ambiente se encontraba en estado líquido. Se añadió de esta forma al resto de los materiales.

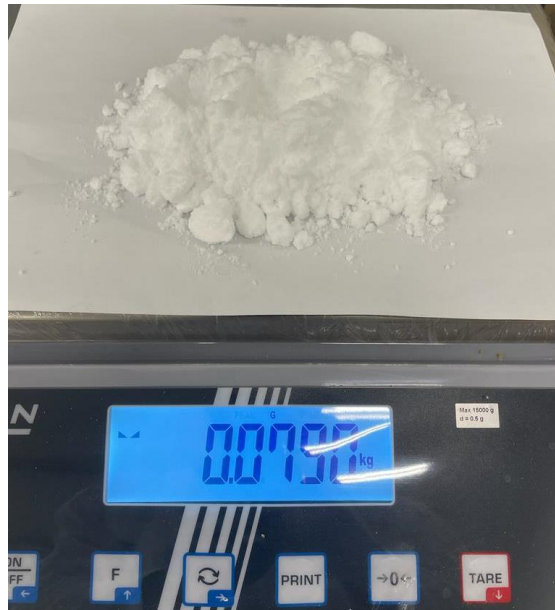


Figura 3-3 PCM RT35

Algunas de las principales características que tienen son:

- Capacidad de almacenamiento de energía térmica: Tienen una alta capacidad de almacenamiento de energía térmica, lo que significa que pueden absorber grandes cantidades de calor durante el día y liberarlo durante la noche y viceversa.
- Composición: Ambos están compuestos por microcápsulas de parafina suspendidas en un polímero, lo que le confiere una gran estabilidad y durabilidad.
- Compatible con diferentes materiales: Se pueden incorporar en una amplia gama de materiales de construcción, como paneles de yeso, pinturas, morteros y aislamientos. En este TFG, los materiales de construcción con los que se mezclarán son los morteros de cal y cemento.
- Reducción del consumo de energía: Al regular la temperatura interior de los edificios, pueden reducir el consumo de energía para calefacción y refrigeración, lo que puede traducirse en ahorros significativos de energía y reducción de costos.
- Contribución a la sostenibilidad: El uso de PCM en la construcción puede contribuir a la sostenibilidad y reducción de la huella de carbono de los edificios, ya que ayuda a reducir el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la climatización.

En las muestras de cal y cemento se han añadido diferentes porcentajes de PCM con el fin de lograr un buen análisis. Estos porcentajes quedan reflejados en la Tabla 3-3 para las muestras de morteros de cal y en la Tabla 3-4 para las de los morteros de cemento.

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

Tabla 3-3 Porcentaje de PCM por muestra de cal

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

Tabla 3-4 Porcentaje de PCM por muestra de cemento

3.2 Metodología experimental

3.2.1 Caracterización del mortero de cal

A través de ensayos normalizados se va a analizar las características básicas de los morteros de cal las cuales tendrán una influencia directa en la durabilidad y resistencia de éstos. Los ensayos que se van a llevar a cabo son los siguientes:

3.2.1.1 Porosidad accesible al agua

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” [49], se utiliza para determinar la densidad real y aparente, así como la porosidad abierta y total de la piedra natural. Esta prueba proporciona información sobre los poros que tienen un tamaño superior a $0,1\mu\text{m}$ y que están conectados entre sí y con el exterior. La porosidad es un factor importante a considerar en la selección de materiales de construcción, ya que puede afectar la durabilidad y la resistencia del material.

La densidad real es la masa de la muestra dividida por su volumen real, mientras que la densidad aparente es la masa de la muestra dividida por su volumen aparente. Según la norma UNE-EN 1015-10:2007 [50], el cálculo de la densidad aparente queda reflejado en la siguiente ecuación:

$$D_B = \frac{M_d}{V_B}$$

Siendo M_d el peso de la muestra una vez secada y V_B el volumen aparente (mL). Este volumen aparente incluye los poros abiertos y cerrados, mientras que el volumen real solo incluye la masa sólida de la muestra. Por lo tanto, la densidad real siempre es mayor que la densidad aparente debido a la presencia de los poros.

La porosidad abierta se refiere a la proporción de poros que están conectados con la superficie exterior del material, mientras que la porosidad total incluye todos los poros, tanto abiertos como cerrados. La porosidad abierta es un factor crítico a considerar en la selección de materiales de construcción, ya que los poros abiertos pueden permitir la entrada de agua y otros agentes externos en el material, lo que puede llevar a la degradación y el deterioro del mismo. Cuanto mayor sea la porosidad accesible, mayor será la posibilidad de que los agentes externos se introduzcan en el material y lo alteren.

Para realizar el cálculo de la porosidad abierta ρ_o (%) se sigue la siguiente ecuación:

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

Donde: m_s es la masa (g) del mortero saturado, m_d la masa (g) del mortero seco y m_h la masa (g) hidrostática del mortero. Los morteros de cal utilizados para esta prueba son: 0B, 1C, 2D, 3D, 4N, 5E, 6D.

Para conseguir estos datos y poder calcular la porosidad abierta (ρ_o) se han seguido los siguientes pasos:

1. Selección de un mortero en forma de cubo para cada tipo de muestra y posterior secado en la estufa a una temperatura de 80 °C durante 72h.
2. Pesaje seco de los morteros.
3. Saturación de las muestras durante 2h eliminando todo el aire del interior de estas introduciendo agua a presión en los poros.
4. Pesaje de las muestras saturadas.
5. Pesaje de las muestras en balanza hidrostática sumergiéndolas completamente en agua.

En resumen, la prueba de la norma UNE-EN 1936:2007 [49] se utiliza para evaluar la densidad y la porosidad de la piedra natural, lo que proporciona información importante sobre su calidad y resistencia. La porosidad abierta es un factor crítico a considerar en la selección de materiales de construcción, ya que puede afectar significativamente la durabilidad del material a largo plazo. [50]

3.2.1.2 Capilaridad

El presente ensayo se ha realizado en base a la norma UNE-EN 1925:1999: “Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad” [51]. Con este ensayo el objetivo es analizar cómo asciende el agua por el cubo de mortero de cal verificando el volumen de poros que presenta el material. Esto es un símil hacia el sector de la construcción en el cual es de especial interés el conocimiento del movimiento de agua ascendente por las fachadas de los edificios y cimientos.

Esta propiedad es primordialmente resultado de la acción de succión, y es esencial en materiales de este tipo y en su uso, debido a que otros agentes destructivos pueden infiltrarse de manera similar y dañar su estructura. Cuando se habla de capilaridad, se hace referencia al aumento o disminución del líquido dentro de los poros del material que está ligeramente sumergido. El tamaño de los poros también influye en este fenómeno, ya que ocurre principalmente en poros con diámetros entre 0,1µm y 100µm. [52]

Se concluye, por ende, que cuanto mayor sea el volumen de poros con un diámetro más pequeño, mayor será la fuerza de succión dentro del material, lo que a su vez resultará en una altura del frente capilar más alto. Esto hará que el material se vea más afectado por el contacto con líquidos en su superficie.

La manera de llevar a cabo este ensayo ha sido haciendo uso de dos cubos por cada muestra de morteros de cal. Se intrudujeron en una cubeta con agua destilada hasta una altura que le cubriese, aproximadamente, unos 3 mm a los cubos (Figura 3-4). Además, los cubos se posaron sobre unas rejillas favoreciendo al máximo el contacto de éstos con el agua logrando unos resultados más realistas. A través de las mediciones de peso en la balanza de precisión realizadas en los tiempos estipulados por la norma, se han reflejado los resultados con las curvas de capilaridad que se mostrarán más adelante. En estas curvas la principal propiedad que se observa es la velocidad de absorción que tienen los diferentes morteros de cal dependiendo de su contenido en material de cambio de fase.

Los cubos utilizados para este ensayo son tres de cada muestra:

- 0C, 0H, 0K
- 1A, 1E, 1F

- 2A, 2C, 2G
- 3B, 3G, 3H
- 4E, 4H, 4Q
- 5C, 5F, 5G
- 6A, 6C, 6F

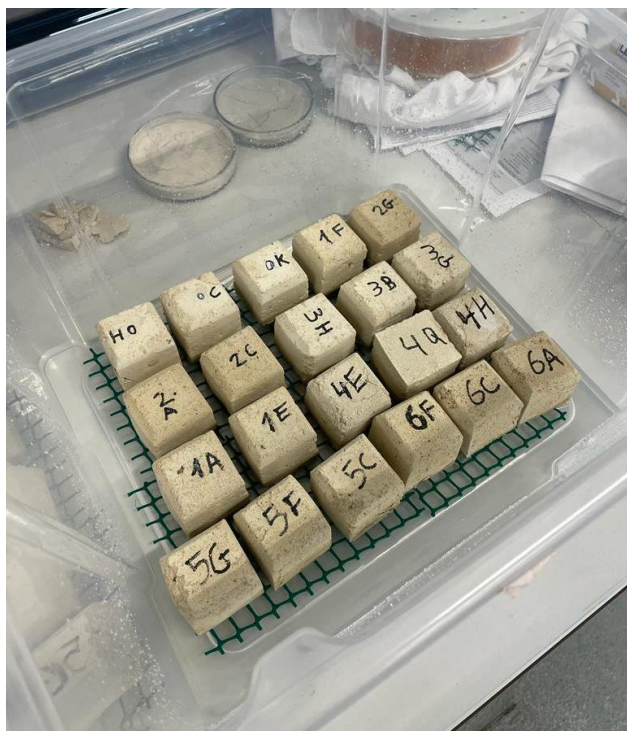


Figura 3-5 Muestras de cal bajo capilaridad

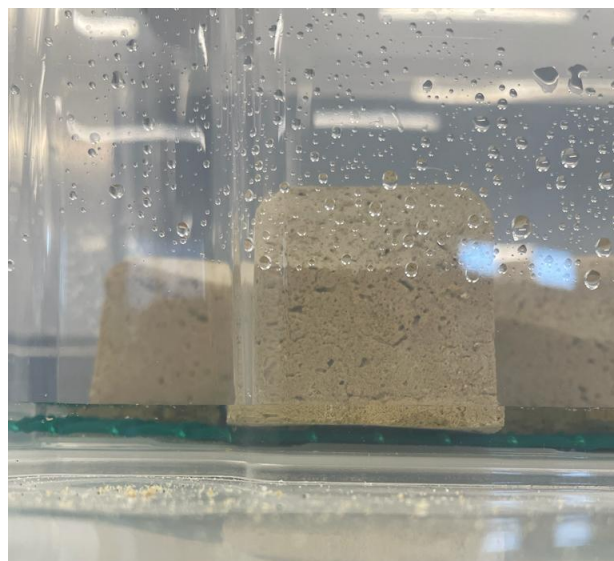


Figura 3-4 Altura del agua en capilaridad

El proceso que se ha seguido, establecido por pasos en la norma UNE EN 1015-18:2003: “Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 18: Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido.” [53], es el siguiente:

1. Limado de la superficie de la muestra hasta conseguir que sea completamente lisa.
2. Secar las muestras en la estufa a una temperatura de 75 °C hasta que se logre un peso constante de éstas.
3. Echar la cantidad de agua pura necesaria en la bandeja hasta llegar a la profundidad mencionada.
4. Depositar las muestras en la bandeja con agua a una altura de 3mm desde su superficie.
5. Anotar los pesos de cada muestra de forma precisa utilizando la balanza de precisión. Los tiempos en los que se realizará la medida de peso serán en el momento en el que el temporizador esté en: 0', 4', 8', 16', 30', 60', 120', 240', 720', 1440'.

3.2.1.3 Porosidad

Este ensayo se realiza de la misma manera que el anterior (capilaridad) siguiendo los pasos especificados por la norma ya mencionada. La gran diferencia con respecto al anterior ensayo es el nivel del agua: en el análisis de porosidad se sumergirán completamente las muestras en agua pura cubriendo la totalidad de éstas.

Por lo tanto, en este ensayo lo que se analiza no es el ascenso del fluido por el mortero sino la capacidad de absorción que tienen los poros de cada material. Para analizar bien esta propiedad ha sido de vital importancia anotar el peso de cada muestra en los tiempos marcados por la norma.

Las muestras de cal utilizadas para llevar a cabo esta prueba han sido (Figura 3-6):

- 0B, 0E, 0D
- 1B, 1C, 1H
- 2B, 2D, 2F
- 3A, 3D, 3F
- 4M, 4N, 4L
- 5D, 5E, 5H
- 6D, 6E, 6H



Figura 3-6 Muestras de cal antes de someterse a porosidad

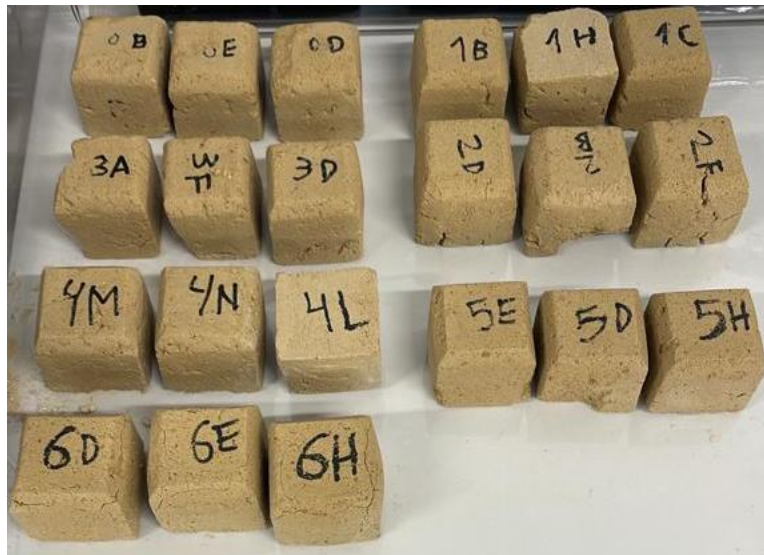


Figura 3-7 Muestras de cal después de someterse a porosidad

Los pasos que se han seguido para este ensayo son:

1. Limado de la superficie de la muestra hasta conseguir que sea completamente lisa.
2. Secar las muestras en la estufa a una temperatura de 75 °C hasta que se logre un peso constante de éstas.
3. Echar la cantidad de agua pura necesaria para cubrir al completo las muestras.
4. Depositar las muestras en la bandeja sobre las rejillas.

5. Anotar los pesos de cada muestra de forma precisa utilizando la balanza de precisión. Los tiempos en los que se realizará la medida de peso serán en el momento en el que el temporizador esté en: 0', 4', 8', 16', 30', 60', 120', 240', 720', 1440'.

3.2.2 Ensayos de durabilidad

Estos ensayos han sido enfocados en la evaluación de cómo los morteros resisten a factores externos como la alteración causada por sales (Na_2SO_4), cambios abruptos de temperatura o ciclos de hielo y deshielo. Para llevar a cabo estos estudios, se midió la disminución de masa de cada muestra después de cada ciclo. Dependiendo del ensayo, las muestras fueron pesadas después de 2 o 5 ciclos, pero primero se secaron en una estufa ventilada a 75 °C durante al menos 24 horas para obtener el peso seco.

Además, se irá documentado fotográficamente la evolución de las muestras para así lograr un análisis más completo en el que se pueda observar de forma visible cómo le afectan cada tipo de ensayos.

3.2.2.1 Alteración por sales

Este ensayo ha sido utilizado para evaluar y analizar la resistencia física y química de los morteros a la sal soluble sulfato de sodio (Na_2SO_4) al 14 % en peso. Esta sal, es absorbida por los morteros contenidos en los recipientes. Una vez absorbida, la sal cristaliza en el interior de los poros del mortero, lo que puede provocar cambios en la masa de las muestras que son observables a lo largo de cada ciclo.

Los cubos utilizados para la prueba de alteración por sulfato de sodio en morteros de cal fueron los siguientes de cada tipo (Figura 3-8):

- 0I, 0L
- 1D, 1G
- 2E, 2H
- 3C, 3E
- 4A, 4K
- 5A, 5B
- 6B, 6G

Los pasos con los que se ha realizado este ensayo han sido los reflejados en la norma UNE-EN 12370:2020: "Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la cristalización de sales" [54].

Para la realización de este ensayo se utilizaron 2 cubos por cada muestra de mortero. Los pasos que se siguieron para completar los ciclos fueron:

1. Hacer la disolución de 14 % en peso de Na_2SO_4 y verter hasta una altura de, aproximadamente, 3mm en el recipiente con rejillas donde se depositarán las muestras.
2. Mantener las muestras sobre la disolución durante 2 horas.
3. Introducir las muestras en la estufa a 75 °C durante otras 2 horas para llevar a cabo su secado.
4. Retirar las muestras de la estufa y dejarlas a temperatura ambiente durante, al menos, 1 hora hasta volver a empezar con el ciclo.

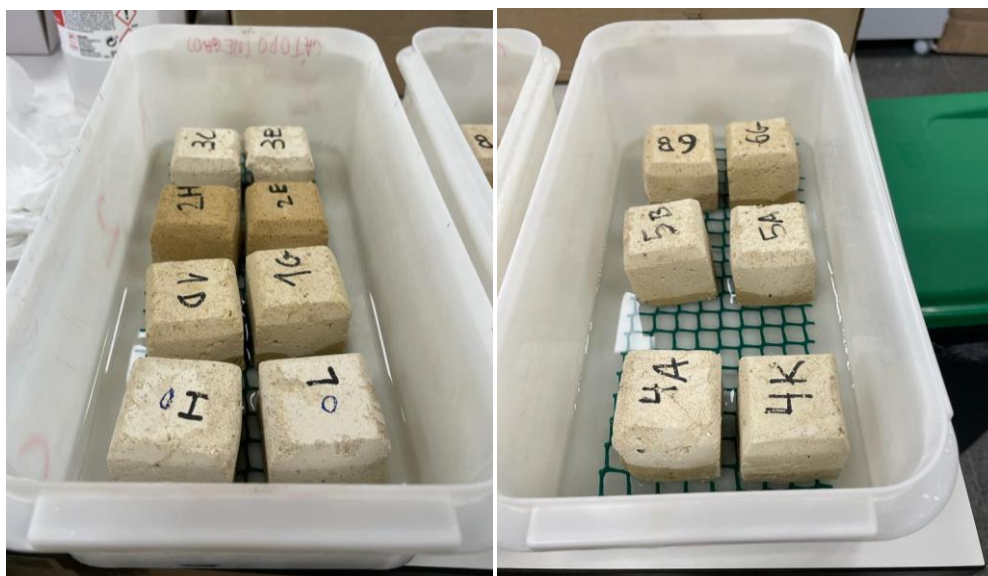


Figura 3-8 Morteros de cal en sulfato de sodio

En el caso de los morteros de cal, al tratarse de muestras más delicadas y frágiles que el cemento, es de vital importancia tratarlas con delicadeza intentando que se deshaga lo menos posible. Con ambos materiales se intentará llevar un seguimiento de la pérdida de peso y documentación gráfica para observar el deterioro que la sal provoque en estos materiales.

Para tomar la medida del peso, será preferible hacerlo cada cinco ciclos y para ello se tendrá que eliminar al completo la sal tanto del interior como del exterior de cada muestra de mortero. Es por ello que para alcanzar la desalinización total se sumergirán las muestras durante 24 horas en agua pura con renovación de ésta tratando de limpiar al máximo las muestras. Una vez terminado este proceso se introducirán en la estufa a una temperatura de 75 °C durante 48 horas. Al finalizar este último paso y limpiar las muestras por la zona exterior, se pesará cada muestra.

3.2.2.2 Propiedades mecánicas: carbonatación con fenolftaleína

○ Cal

La carbonatación es un proceso que afecta a los morteros de cal. Como ya se ha dado a conocer, estos morteros, se componen de cal hidratada y arena, y su pH naturalmente alto (alrededor de 12) es resultado de la reacción química de la cal con el agua. El dióxido de carbono atmosférico penetra en los poros del mortero de cal y reacciona con la cal hidratada, lo que resulta en la formación de carbonato de calcio, agua y la reducción del pH del mortero.

La carbonatación del mortero de cal tiene una serie de efectos en la durabilidad y estabilidad del mortero y de las estructuras en las que se usa. Aunque el carbonato de calcio formado es resistente y protege el mortero, la pérdida de la alta alcalinidad del mortero puede hacer que sea más vulnerable a la erosión y la degradación.

La carbonatación del mortero de cal también puede afectar la adherencia y la resistencia del mortero a largo plazo, especialmente si se usa para reparar estructuras de mampostería que contienen ladrillos antiguos y porosos, que pueden absorber el agua y permitir la penetración del dióxido de carbono en el mortero.

Para prevenir o limitar la carbonatación en morteros de cal, se pueden tomar diferentes medidas como la utilización de morteros con una menor proporción de cal hidratada, el uso de aditivos que

reduzcan la permeabilidad del mortero y la aplicación de recubrimientos protectores que reduzcan la entrada de dióxido de carbono en el interior del mortero. Es importante tener en cuenta que los morteros de cal son materiales porosos y transpirables, por lo que cualquier recubrimiento o sellador aplicado debe permitir que el mortero respire y evite la retención de humedad.

Para el análisis de esta propiedad en los morteros de cal, se ha hecho uso de una solución de fenolftaleína al 1 % disuelta en alcohol etílico al 70 % que permite observar la zona carbonatada y la zona sin carbonatar. Éste es un indicador de pH ácido-básico comúnmente utilizado en la industria de la construcción.

Para llevar a cabo la prueba de carbonatación con fenolftaleína, se aplica una pequeña cantidad de la solución en la superficie del mortero de cal. Si el mortero no ha sufrido carbonatación, la solución permanecerá incolora. Sin embargo, si el mortero ha sufrido carbonatación, la solución de fenolftaleína cambiará de incolora a rosa en las áreas donde el pH ha disminuido debido a la reacción de carbonatación. El cambio de color a rosa se produce en soluciones alcalinas con un pH de alrededor de 8,2 a 10.

Es importante tener en cuenta que la prueba de carbonatación con fenolftaleína solo puede proporcionar información sobre la presencia o ausencia de carbonatación en la superficie del mortero de cal, y no proporciona información sobre la profundidad o la extensión de la carbonatación en el interior del mortero [55].

3.2.3 Análisis termogravimétrico y calorimetría de barrido diferencial

El análisis termogravimétrico (TGA) y la calorimetría de barrido diferencial (DSC) se utilizan para analizar cómo varía la masa de una muestra durante un tiempo determinado y bajo condiciones de temperatura específicas. Estos métodos son especialmente útiles para medir y estudiar las reacciones de descomposición primarias que ocurren en materiales sólidos y líquidos, como la adsorción y desorción, así como las reacciones de descomposición en ambientes de gas inerte u oxígeno. [43]

El objetivo es medir y analizar la variación de temperatura, masa y flujo de calor de la muestra. Para este análisis se utiliza el equipo Labsys Evo 1180 (Figura 3-10), que cuenta con una balanza y un horno que puede alcanzar los 1180°C. En la primera tarea, se programa el equipo con distintas secuencias de temperatura para la muestra de mortero, junto con las velocidades de calentamiento y enfriamiento, la refrigeración y los gases de arrastre correspondientes. Esta programación de las etapas de temperatura a la que se someten las muestras cuenta con grandes detalles que hacen que el análisis sea una experiencia completa: temperatura mínima, temperatura máxima, rampa de aumento de grados en relación con el tiempo. Toda esta programación se lleva a cabo a través del programa “Acquisition”. Luego se utiliza el software “Processing” para procesar y evaluar los resultados obtenidos y extraer las conclusiones necesarias.

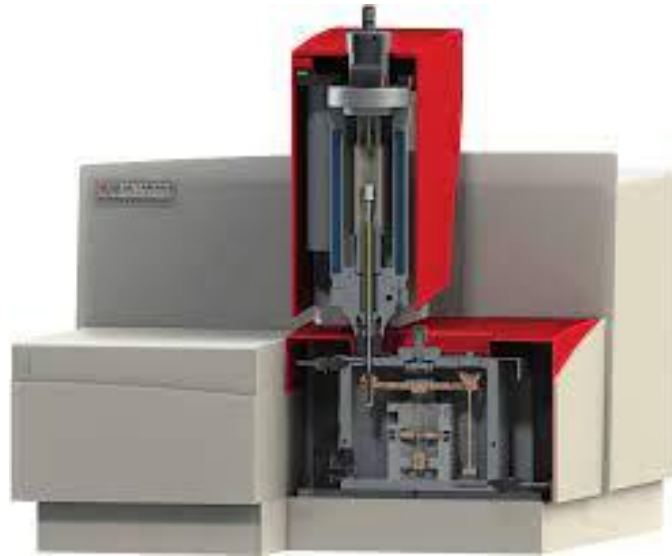


Figura 3-10 Equipo Labsys Evo 1180 [43]

Las muestras de morteros de cal utilizadas para la realización de los ensayos de variación de temperatura y pérdida de masa fueron los vasos de cada tipo de muestra, excepto para la muestra de referencia que se utilizó uno de los cilindros ya que no se disponía de un ejemplar tipo vaso para esa muestra. Para ello primero se secaron los morteros en la estufa a una temperatura de 75 °C y, a continuación, se conservaron en vacío (Figura 3-9) hasta llegado el momento de realizar el análisis termogravimétrico.

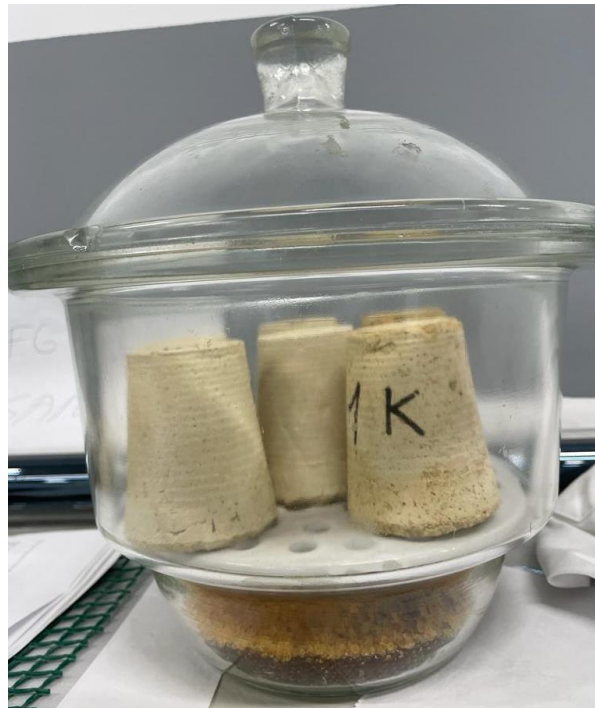


Figura 3-9 Morteros de cal conservados en vacío

Para realizar una extracción lo más realista posible de cada muestra, se partió por la mitad cada uno de los vasos pudiendo extraer la muestra a analizar del centro de cada mortero de la forma más homogénea posible.

Siguiendo con la metodología, se raspó el centro de cada mortero obteniendo los polvos que, a continuación, fueron tamizados de tal manera que se lograron polvos de similar tamaño para cada muestra.

Las muestras fueron identificadas y almacenadas en pequeños tubos de plástico para lograr una mejor organización y maniobrabilidad de éstas durante los diferentes ensayos (Figura 3-11).



Figura 3-11 Identificación de las muestras de mortero

Para el análisis de variación de temperaturas se hizo entre los rangos de temperatura que pusieran en juego las temperaturas de fusión de los materiales de cambio de fase (PCM) utilizados. Estas temperaturas pico son 15 °C para conseguir una temperatura menor que la del PCM RT18 y 50 °C para conseguir una temperatura mayor que la del PCM RT35.

En este análisis se realiza un ensayo por cada muestra con diferentes porcentajes y combinaciones de PCM. Cada ensayo consta de 3 ciclos en los que, como ya se ha mencionado anteriormente, se varía la temperatura entre 15 °C y 50 °C. Esto se realiza durante tres ciclos dejando, entre ciclo y ciclo, un tiempo de 5 minutos a 15 °C. Para la interpretación de los resultados, se descartará el primer ciclo por motivos de considerar resultados más realistas con la muestra estabilizada.

Los ciclos mencionados se pueden observar en la Figura 3-12:

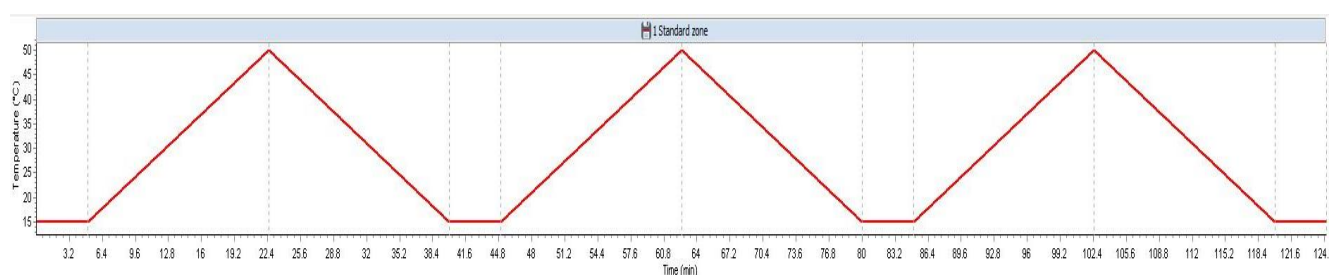


Figura 3-12 Ciclos de variación de temperatura

Por otra parte, también se realiza el ensayo de pérdida de peso de cada muestra. Este ensayo es diferente al anterior ya que se eleva mucho más la temperatura de la muestra durante más tiempo. El máximo de temperatura alcanzado es de 900 °C y el ciclo programado es el mostrado en la Figura 3-13.

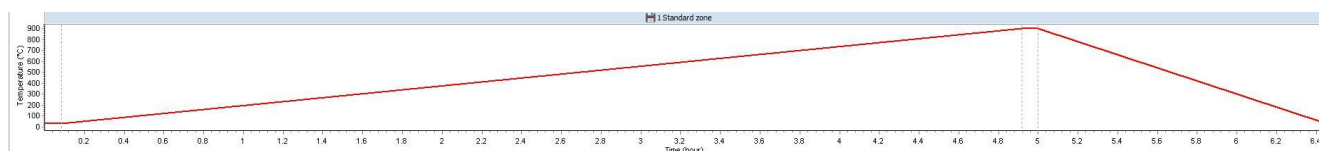


Figura 3-13 Ciclo de pérdida de peso

La programación de estos ciclos es ejecutada por el programa “Acquisition” (Figura 3-15) indicando los parámetros de cada ciclo:

- Temperatura mínima

- Temperatura máxima
- Rampa de temperatura (°C/min)
- Tiempos de cada ciclo
- Gas utilizado para proteger la muestra

		Zone Duration		7500		Valves			TG Tare
#		Initial T (°C)	Final T (°C)	S.r. (K/min)	Time (s)				
1	→	15	15	0	300	■	■	■	■
2	→	15	50	2	1050	■	■	■	■
3	→	50	15	2	1050	■	■	■	■
4	→	15	15	0	300	■	■	■	■
5	→	15	50	2	1050	■	■	■	■
6	→	50	15	2	1050	■	■	■	■
7	→	15	15	0	300	■	■	■	■
8	→	15	50	2	1050	■	■	■	■
9	→	50	15	2	1050	■	■	■	■
10	→	15	15	0	300	■	■	■	■

Figura 3-15 Programación de ciclos de variación de temperaturas en “Acquisition”

[illegible]

Figura 3-14 Programación de pérdida de peso en “Acquisition”

Por último, una vez programado el ensayo, se procede a especificar el tipo de prueba que se va a hacer. Antes de proceder con lo que sería uno de los ensayos de las muestras (Figura 3-16), hay que hacer un ensayo del blanco (pocillo sin muestra) en el que se le somete a la misma programación de variación de temperaturas previamente realizada. De esta manera, cuando se vaya a realizar el ensayo de cada una de las muestras se debe poner como referencia dicho blanco para que se pueda realizar un análisis preciso teniendo en cuenta únicamente el contenido del pocillo.

Selected Experiment

Apparatus Labsys Evo 1150 - TG-DSC 1200°C

Experiment Properties
⊞

Name

Blank

Macro

Mass mg

Molar Mass g/mol

Crucible

Al/203 100 µl

Comment

MUESTRA 6

Procedure
⊞

Procedure Summary
⊞

Procedure Properties
⊞

General
⊞

Experiment Group	Test		
End Mode	Stop		
Temperature	Sample and Furnace Temperatu		
Carrier Gas 1	N2		
Carrier Gas 2	Air		

Measure Range
⊞

TG range

Small

Figura 3-16 Programación de parámetros en el software Acquisition del equipo

Otros parámetros a especificar son el peso del pocillo con la muestra, el tipo de prueba que se va a realizar, el pocillo y gas que se utiliza. Una vez introducidos todos estos datos se introduce el pocillo con la muestra de unos 300mg aproximadamente para la prueba de variación de temperaturas (Figura 3-17) y 450mg para la de pérdida de peso, se activa el flujo de agua para la refrigeración y se abre la válvula de nitrógeno. Finalmente se cierra el equipo y empieza el ensayo. Cabe señalar que para el ensayo de variación de temperaturas se utiliza el pocillo pequeño mientras que para el de pérdida de peso el grande.

Figura 3-17 Pocillo con muestra de cal

45

3.2.4 *Análisis termográfico*

En este ensayo se estudia cómo diferentes tipos de mortero, con diferentes composiciones de material de cambio de fase, pueden almacenar calor y reaccionar en diferentes ambientes. Se examinan específicamente dos ambientes diferentes: calor versus frío (bajas temperaturas) y frío versus calor (altas temperaturas).

Es importante destacar que, para que un cuerpo emita radiación, debe estar por encima del cero absoluto (0 K). La metodología utilizada en este estudio implica el análisis de las muestras mediante una cámara térmica FLIR i7. Las curvas termográficas se obtienen a partir de estas mediciones. La cámara térmica FLIR i7 cuenta con herramientas fundamentales, como Flir Tools y Flir Report Studio, que se utilizan para medir y extraer los valores de temperatura de las muestras y del ambiente circundante. Las mediciones se tomaron a dos distancias diferentes (2 cm y 5 cm desde la base) y la cámara térmica tiene ajustes para las escalas de temperatura y enfoque con el fin de lograr unos mejores resultados del experimento [56].

Para la realización de este ensayo se utiliza un mortero de cal de forma cilíndrica para cada tipo de muestra. Así, se emplean un total de 7 morteros para cada ensayo. Los pasos que se siguieron para cada experimento fueron:

- Ensayo de calentamiento
 1. Se introducen los morteros en el congelador durante 72h quedando a una temperatura de -8 °C aproximadamente.
 2. Se llena de agua caliente (22,5 °C) una bandeja. El nivel del agua es lo suficiente como para cubrir la base de los morteros. Además, se usan las redecillas para que todos tengan el mismo contacto con el agua caliente.
 3. Se introducen las muestras en la bandeja quedando todas en línea para obtener una mejor comparativa.
 4. Se realiza una foto térmica cada 30 minutos observando la evolución de las muestras hasta que haya una clara diferencia entre ellas.
 5. Análisis de resultados
- Ensayo de enfriamiento
 1. Se introducen los morteros en la estufa (80 °C) durante 72h.
 2. Se llena de agua fría (18,5 °C) la base de la bandeja. Se hace el mismo uso de redecillas que para el anterior ensayo.
 3. Se introducen las muestras en la bandeja quedando todas en línea para obtener una mejor comparativa.
 4. Se realiza una foto térmica cada 30 minutos observando la evolución de las muestras hasta que haya una clara diferencia entre ellas.
 5. Análisis de resultados

4 RESULTADOS

4.1 Caracterización del mortero de cal

- **Porosidad accesible al agua**

Para la obtención del valor de la porosidad absoluta, se sigue la siguiente fórmula:

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

En la Tabla 4-1 Peso seco, saturado e hidrostático se muestran los datos obtenidos, para cada muestra, tanto de peso hidrostático como de peso saturado y peso seco:

	M0	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Peso seco (g)	155,13	150,46	142,24	145,40	163,88	150,15	150,96
Peso saturado (g)	186,41	181,94	-	178,61	198,74	178,58	161,33
Peso hidrostático (g)	93,40	87,00	-	87,00	97,50	86,10	75,00

Tabla 4-1 Peso seco, saturado e hidrostático

En la Tabla 4-2 se muestran los resultados obtenidos de la porosidad abierta ρ_o (%):

	M0	M1	M2	M3	M4	M5	M6
ρ_o (%)	33,63	33,16	-	35,94	34,43	30,74	12,01

Tabla 4-2 Porosidad abierta morteros de cal

Observando los datos previamente reflejados, queda demostrado que la muestra que menos porosidad abierta presenta es la número 6 la cual contiene un 10 % de PCM RT18 y 10 % de PCM RT35. Esto se debe a que la combinación de estos dos tipos de PCM son los más adecuados para llenar los poros del mortero de cal y por tanto, los más recomendados para reducir su porcentaje de porosidad abierta.

En cuanto al resto de muestras, todas tienen un valor similar entre ellas siendo el menor valor el de la muestra 5 cuyo contenido es de un 5 % de PCM RT18 y 5 % de PCM RT35. Esto corrobora lo comprobado: la combinación de los dos tipos de PCM tiene relación directa con la disminución de

porosidad abierta en los morteros de cal. Durante el ensayo realizado la muestra 2 (20 % PCM RT35) se deshace completamente al ser sometida a saturación para su posterior pesaje.

En resumen, la muestra 6 al tener menor porosidad abierta permite una menor entrada de agua y otros contaminantes. Esto influye en un aumento de su durabilidad y resistencia a largo plazo. Además, debido a este bajo porcentaje de porosidad, se puede afirmar que el mortero tendrá mejor adherencia a las superficies y tendrá mejor resistencia mecánica.

4.1.1 Capilaridad

Una vez realizado el ensayo de capilaridad para las diferentes muestras siguiendo los pasos especificados en el apartado de metodología, se han obtenido los resultados mostrados en la Figura 4-1.

Con el fin de reducir el error en la determinación del valor de la capilaridad, se ha realizado la media ponderada de los tres cubos de cada muestra que se ha sometido al ensayo.

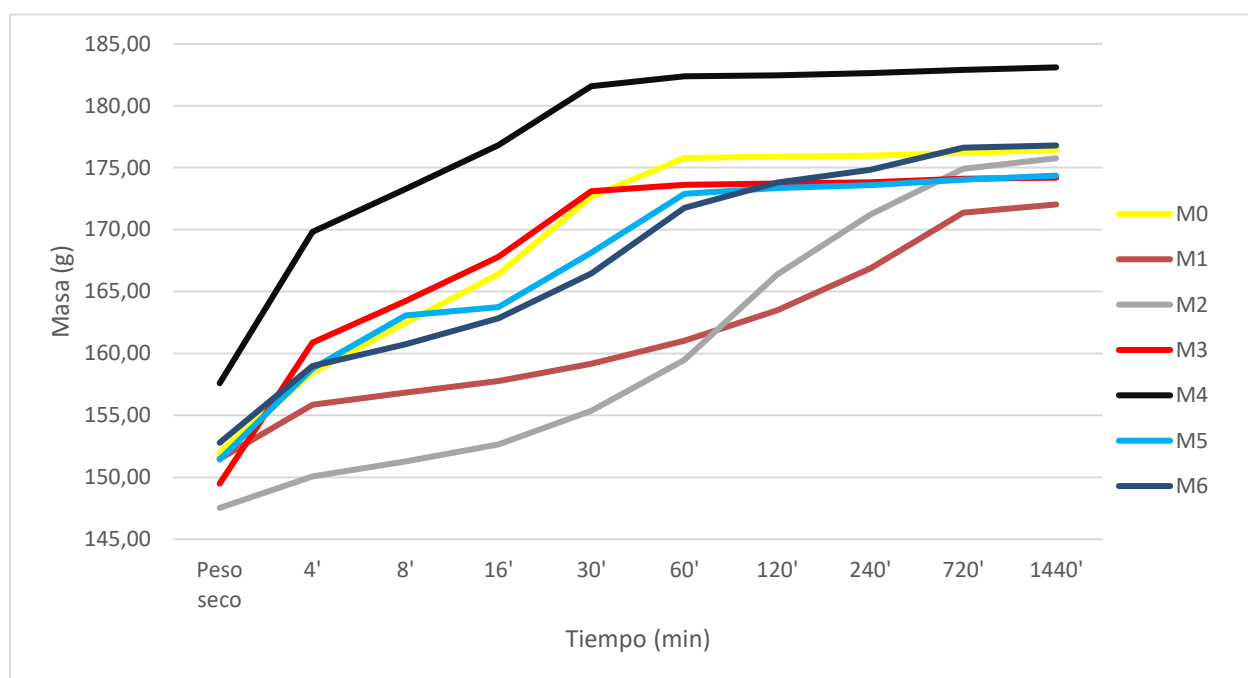


Figura 4-1 Capilaridad morteros de cal

Las conclusiones que se pueden obtener de la Figura 4-1 son claras. En primer lugar, se observa que las muestras 3 (10 % RT18), 4 (20 % RT18), 5 (5 % RT18 y 5 % RT35), 6 (10 % RT18 y 10 % RT35) y la de referencia siguen un comportamiento muy parecido. Todas ellas absorben el agua a una velocidad parecida.

Las dos muestras que sí que posponen más en el tiempo la absorción del agua son la muestra 1 (10 % RT35) y 2 (20 % RT35) siendo más tardía para la muestra 1.

En cuanto a la cantidad de agua absorbida por cada muestra, podemos ver reflejado en la Tabla 4-3, el porcentaje de agua absorbido por cada muestra. Este porcentaje es un indicador claro de qué muestra es mejor para este ensayo demostrando que se opone más a absorber agua y, por lo tanto, a dañar menos su estructura.

	M0	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Agua absorbida (%)	13,04	11,25	17,76	14,03	13,20	11,85	14,03

Tabla 4-3 Cantidad de agua absorbida por capilaridad

La muestra 1 es la que menos agua absorbe con un porcentaje del 11,25 % y la 2 es la que más absorbe siendo el porcentaje de 17,76 %.

Por lo tanto, a la vista de los resultados obtenidos, se puede determinar que la muestra número 1 (10 % PCM RT35) es la mejor para este tipo de ensayo ya que muestra:

- Baja absorción de agua
- Oposición a la absorción siendo más lenta

4.1.2 Porosidad

Tras realizar el ensayo de porosidad para las diferentes muestras, ya mencionadas en el apartado de metodología, se obtienen los resultados mostrados en la Figura 4-2. Para conseguir unos resultados lo más aproximados a la realidad se ha realizado la media ponderada de los 3 cubos de cada tipo de muestra utilizados para llevar a cabo el ensayo.

De la Figura 4-2 se pueden obtener ciertas conclusiones sobre los resultados obtenidos. A primera vista se observa que la muestra de referencia sin PCM es la que más rápido alcanza su máximo de absorción de agua consiguiéndolo en los primeros 4 minutos de ensayo. A partir de ahí mantiene el mismo nivel de agua absorbida hasta el final del ensayo 24 horas después. Junto a la muestra de referencia, siguen un comportamiento prácticamente idéntico la muestra 4 (que contiene un 20 % de PCM RT18) y la muestra 5 (que contiene un 5 % de PCM RT18 y 5 % de PCM RT35). La muestra 4, al igual que la de referencia, alcanza el máximo de agua absorbida en los primeros 4 minutos. Sin embargo, la muestra 5 no alcanza su máximo hasta transcurridos los primeros 8 minutos del experimento.

Las tres muestras que varían más su comportamiento son la muestra 6 (10 % PCM RT18 y 10 % PCM RT35), 2 (20 % PCM RT35) y 1 (10 % PCM RT35). Las muestras 1 y 6 tienen un comportamiento muy similar absorbiendo una cantidad parecida de agua siguiendo una progresión continua en el tiempo alcanzando el máximo de agua absorbida al final del ensayo. Así mismo, la muestra 2 tiene el mismo comportamiento aunque absorbiendo una cantidad mayor de agua. Esta muestra es la que más agua absorbe a lo largo del estudio realizado.

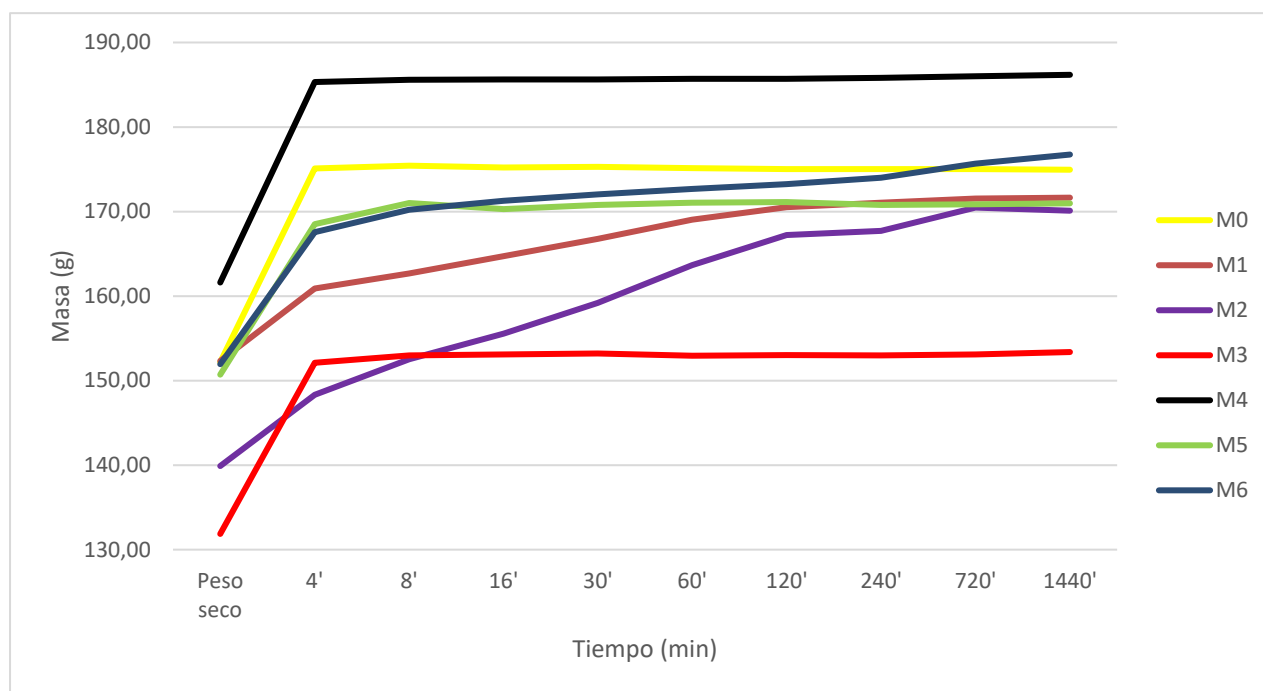


Figura 4-2 Porosidad morteros de cal

Con el fin de obtener una mejor visión general sobre el ensayo y sacar unas mejores conclusiones, en la Tabla 4-4 se indica el porcentaje de agua que absorbe cada muestra a lo largo de todo el ensayo.

	M0	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Agua absorbida (%)	13,04	11,25	17,76	14,03	13,20	11,85	14,03

Tabla 4-4 Cantidad de agua absorbida por porosidad

Por lo tanto se observa que la muestra 2 (20 % RT35) es la que más agua absorbe con un porcentaje de 17,76 % mientras que la muestra 1 (10 % RT35) es la que menos con 11,25 % de agua absorbida.

La conclusión de este análisis es que la muestra que mejor se comporta ante el ensayo de porosidad es la 1 debido a dos motivos:

- Baja absorción de agua
- Oposición a la absorción posponiéndola en el tiempo

4.2 Ensayos de durabilidad

Estos ensayos buscan analizar cómo los morteros con material de cambio de fase se comportan ante ambientes agresivos como ciclos de hielo y deshielo, cambios bruscos de temperatura y exposición a sales solubles (Na_2SO_4), con el objetivo de evaluar su resistencia a agentes externos similares a los que experimentarán una vez en servicio.

Para este fin, se registró la pérdida de masa de cada probeta a medida que se desarrollaban los ciclos experimentales, tras secarlas previamente en una estufa ventilada a 75 °C durante 24 horas para obtener su peso seco. Esto permitió comparar los resultados con los morteros de referencia y entre sí, obteniendo datos realistas y coherentes. Además, se tomaron fotografías de cada probeta en cada ensayo para analizar su variación a lo largo de los ciclos, de manera similar al seguimiento del peso. Es importante reseñar que debido a la naturaleza de cada material, hay ciertas muestras que directamente no han

conseguido pasar los ciclos bajo los que han sido sometidos y, por lo tanto, no se tienen datos en cuanto a su peso ya que es insignificante tras comprobar que son materiales no aptos para dichas pruebas. Estos ensayos también verán plasmada su evolución en este trabajo a través de las fotografías.

4.2.1 Alteración por sales

4.2.1.1 Morteros de cal

El análisis por alteración de sales, tanto en los morteros de cal como en los de cemento, se ha realizado con una disolución de sulfato de sodio en 14 % de peso. Para preparar esta disolución se mezcló 140 gramos de sulfato de sodio con 1 litro de agua destilada.

Se introdujeron las muestras en las bandejas con el fin de que soportaran un mínimo de cinco de los ciclos anteriormente especificados. Los efectos que la sal provocaba en los morteros eran notablemente visibles tras el primer ciclo como podemos observar en la Figura 4-3. En este ciclo la muestra que se vió más afectada provocando ya la primera grieta en ella fue la 1G. Esta muestra contiene un 10 % de RT35.



Figura 4-3 Muestras de cal tras el primer ciclo de alteración por sales

Al continuar con los ciclos vemos como la muestra que estaba más dañada (1G) acaba descomponiéndose por completo además de producir grandes daños en otras muestras. Al realizar el secado de los morteros se puede seguir viendo cómo el sulfato de sodio sigue actuando incrementando el daño.



Figura 4-4 Morteros de cal antes del secado del tercer ciclo



Figura 4-5 Morteros de cal después del secado del tercer ciclo

Las imágenes mostradas (Figura 4-4, Figura 4-5) son correspondientes al tercer ciclo del proceso y, tras ver la reacción que tenían ante la sal y la complicada manejabilidad que tenían para pasarlas de la estufa a la bandeja por su aspecto pastoso, se optó por no llegar al quinto ciclo y proceder a la desalinización completa de éstas para tratar de tomar la medida del peso.

Para llevar a cabo la desalinización se introdujeron las muestras en agua pura de tal forma que quedaban cubiertas enteras. A las 5 horas de realizar este paso, se descompusieron todas ellas como se muestra en las siguientes imágenes (Figura 4-6):



Figura 4-6 Morteros de cal descompuestos tras proceso de desalinización

4.2.2 Propiedades mecánicas: carbonatación con fenolftaleína

Una vez aplicada la solución de fenolftaleína en los morteros de cal en forma de vaso partidos a la mitad, se deja reposar el ensayo durante un total de 5 días hasta tomar las medidas del frente de carbonatación e imágenes. Cabe señalar que al no haber vaso de mortero de cal para el mortero de referencia, se ha utilizado uno de los cubos partidos por la mitad.

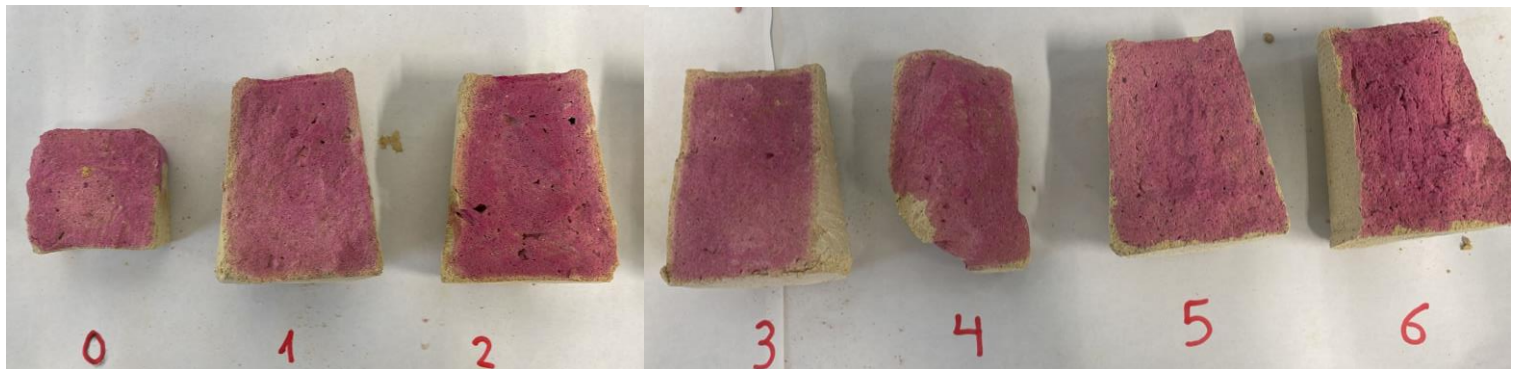


Figura 4-7 Carbonatación con fenolftaleína en morteros de cal

En la Figura 4-7 se comprueba hasta dónde ha llegado el frente de carbonatación en cada muestra de mortero. Así mismo, en la Tabla 4-5 se muestra, en milímetros, la medida del mismo.

	M0	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Frente de carbonatación (mm)	0	4,30	3,00	2,64	1,83	0	0

Tabla 4-5 Frente de carbonatación en morteros de cal

Por lo tanto, se verifica que la muestra en la que menos carbonatación se da es en la número 1. Este mortero contiene un 10 % de PCM RT35. Esto indica que este mortero será el mayor duradero, necesitará menor mantenimiento que el resto de morteros, reducirá su impacto ambiental (ya que no se tendrá que reemplazar tanto como los otros), producirá un mayor ahorro de energía y mejorará la seguridad impidiendo que las construcciones se vean derruidas.

4.3 Análisis termogravimétrico y calorimetría de barrido diferencial

- *Pérdida de peso*

Una vez realizado el ensayo de pérdida de peso, se han graficado los resultados obtenidos para las diferentes muestras:

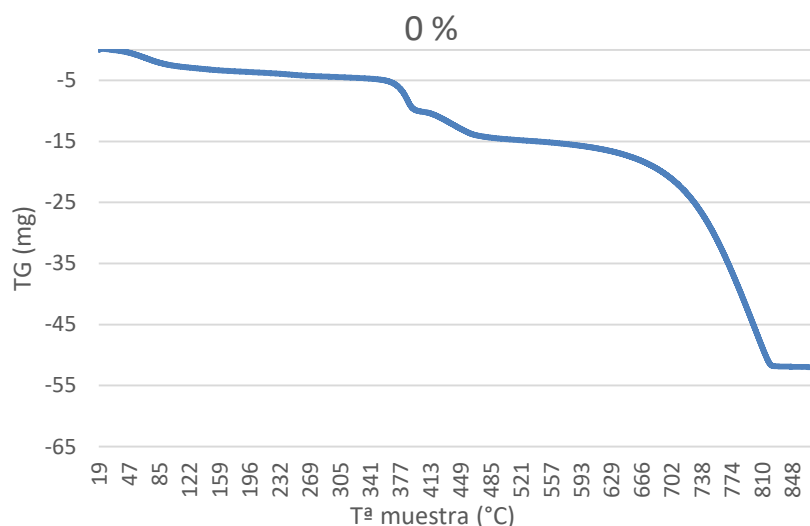


Figura 4-8 Pérdida de peso de la muestra de referencia M0

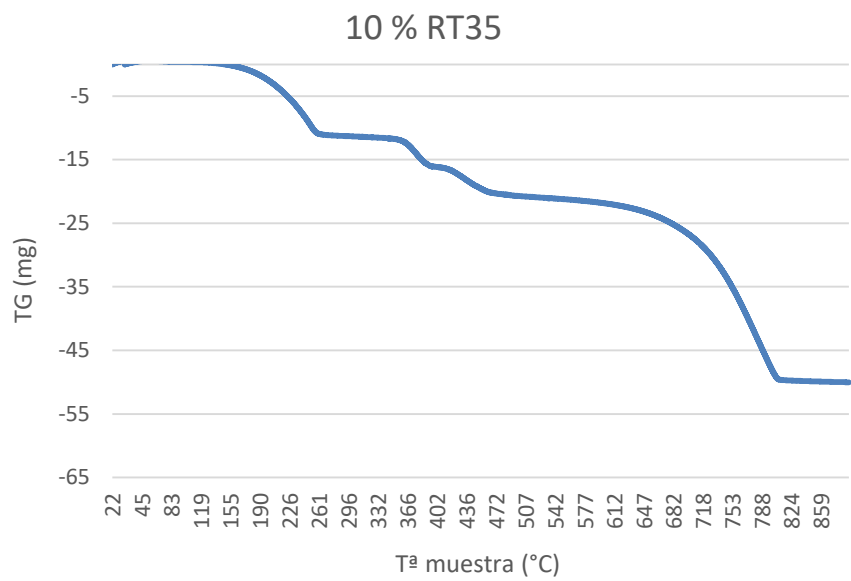


Figura 4-9 Pérdida de peso de M1

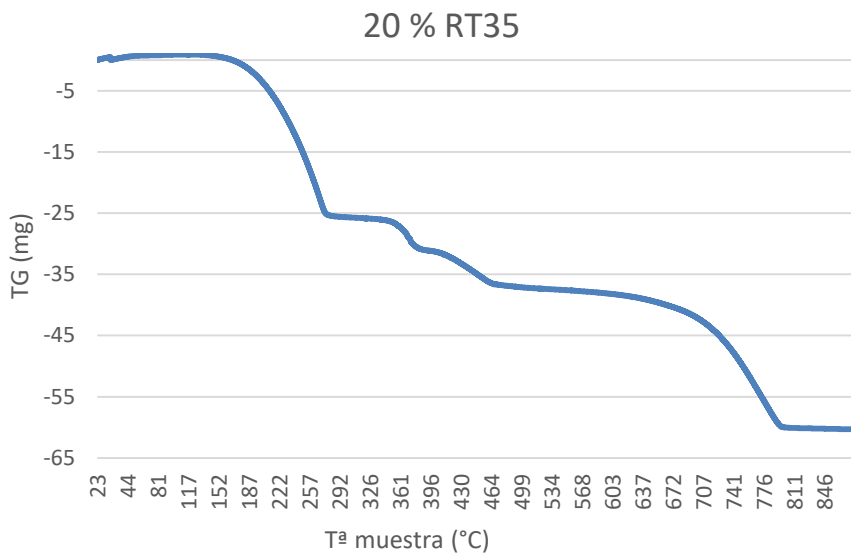


Figura 4-10 Pérdida de peso de M2

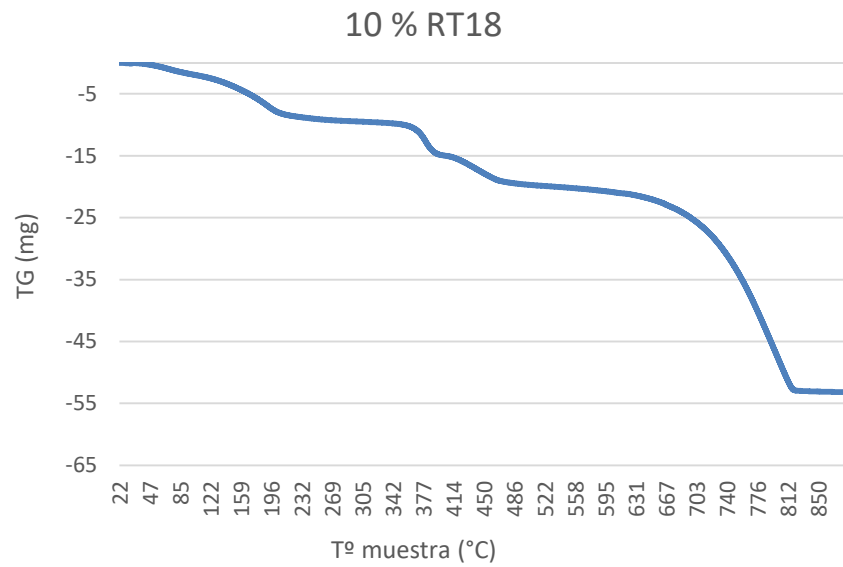


Figura 4-11 Pérdida de peso de M3

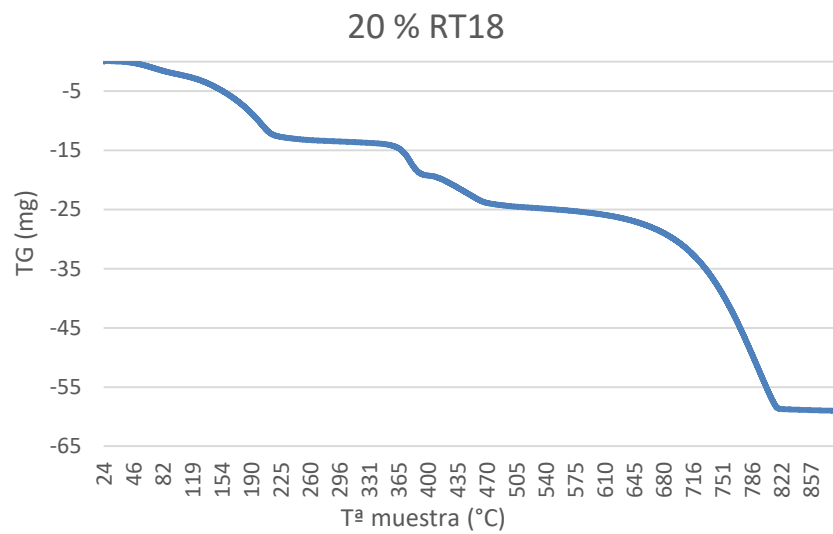
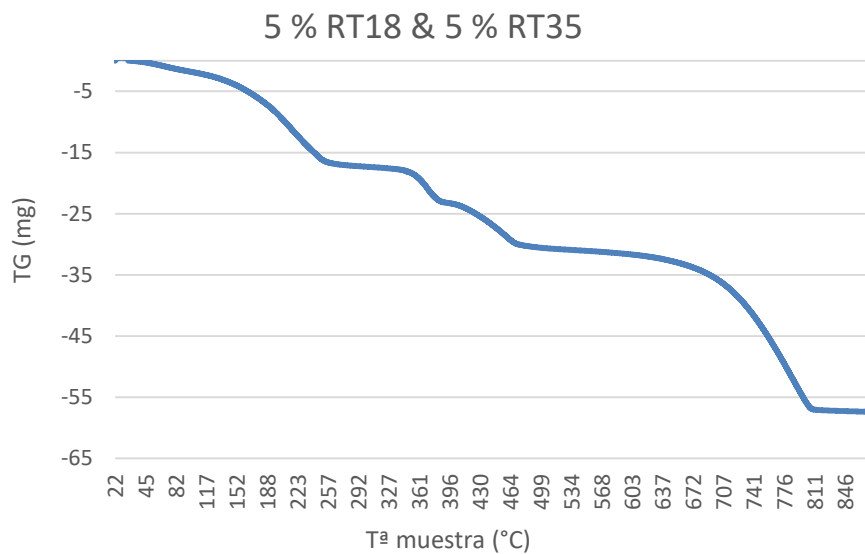
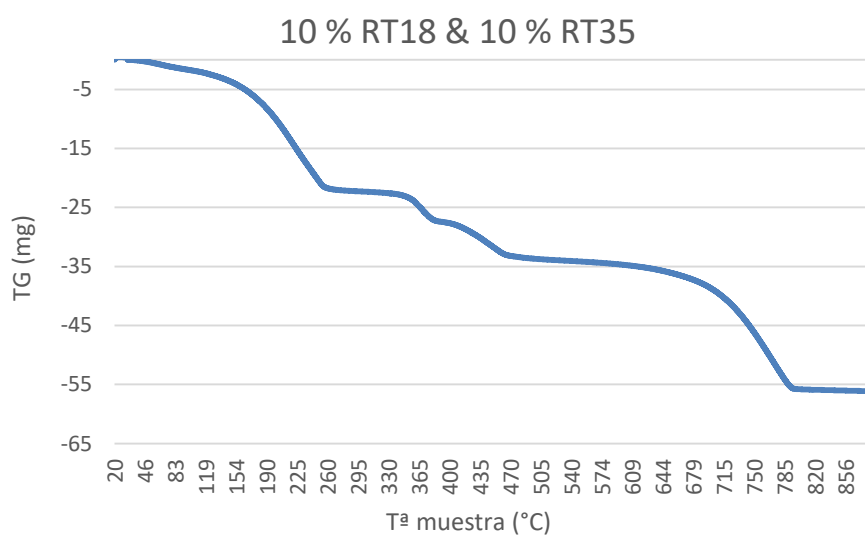


Figura 4-12 Pérdida de peso de M4

**Figura 4-13 Pérdida de peso de M5****Figura 4-14 Pérdida de peso de M6**

Además, en la Tabla 4-6 se ha recopilado el mínimo de cada gráfica, es decir, la pérdida total de masa que se ha dado en cada muestra:

	M0	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Pérdida de peso (mg)	52,04	50,02	60,35	53,21	59,03	57,44	56,15

Tabla 4-6 Pérdida de masa morteros de cal

Observando las gráficas de pérdida de peso y la Tabla 4-6, que nos indica la pérdida total de peso por cada muestra, llegamos a las siguientes conclusiones:

La muestra de referencia (sin PCM) es la que obtiene mejores resultados en este ensayo debido a dos motivos: necesita más temperatura que las demás muestras para perder masa y es, junto a M1 y M3, la que menos masa ha perdido a lo largo de la prueba. Dicho esto, hay que señalar que tanto M1 como M3 muestran un comportamiento similar a la muestra de referencia pero no logran mejorar los resultados.

Además, cabe señalar que el mortero M2 obtiene el peor resultado teniendo la mayor pérdida de masa y necesitando, junto al mortero M5, una de las menores temperaturas para llegar al máximo punto de pérdida de masa. Esta temperatura es de unos 879 °C.

• Variación de temperatura

En cuanto al ensayo de variación de temperatura, los resultados obtenidos son los mostrados en la Figura 4-15. Se muestra la evolución del flujo de calor (μV) respecto al tiempo (minutos) de todas las muestras en una misma gráfica con el fin de obtener una mejor comparativa. Para la elaboración de éstas se ha eliminado el primer ciclo de los tres realizados durante el ensayo termogravimétrico.

Durante los ensayos se han sometido las diferentes muestras a una variación de temperaturas con una temperatura máxima de 50 °C y una mínima de 15 °C.

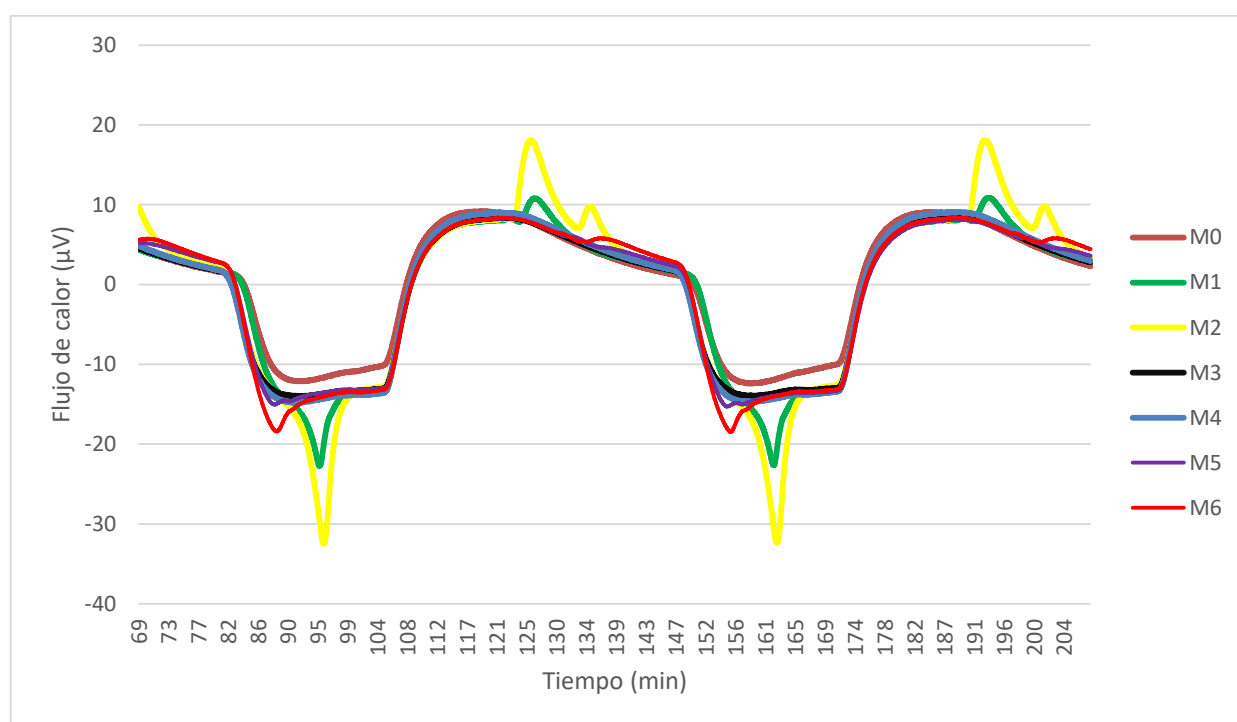


Figura 4-15 Variación de temperatura morteros de cal

Tras graficar los resultados obtenidos, se observa que M2 (20 % RT35) tiene el mejor resultado en este ensayo ya que es el mortero que tiene una mayor capacidad de almacenamiento y liberación de energía térmica, lo que puede ser beneficioso en aplicaciones de construcción y climatización que buscan aprovechar las propiedades de los materiales de cambio de fase para aumentar la eficiencia energética.

Es interesante señalar que junto a M2, el mortero M1 (10 % RT35) también muestra un resultado mejor que los demás aunque no tan bueno que M2. Esto deja ver que el PCM RT35 obtiene muy buenos resultados en entornos donde se dan variaciones de temperatura de los rangos analizados.

4.4 Análisis termográfico

• Ensayo de enfriamiento

En este ensayo se exponen los 7 morteros calientes rondando una temperatura inicial de 65 °C aproximadamente con el fin de ver cuál es el que almacena mejor esta temperatura sumergiéndolos parcialmente en una capa superficial de agua fría que está a una temperatura de 18,5 °C

Esta prueba se ha llevado a cabo durante un tiempo en el que se estabilizaran las temperaturas (120 minutos) y se obtuviera una clara diferencia en cuál es el mortero que mejor almacena el calor. Para tener una mejor visión de este experimento se ha graficado la temperatura de cada mortero en dos puntos diferentes: a 2 centímetros y 5 centímetros de la base. Así se comprueba la evolución de la pérdida de calor a lo largo de todo el mortero.

Las líneas discontinuas de la gráfica representan las temperaturas en la parte alta del mortero mientras que las líneas continuas plasman la temperatura de la base del mortero con respecto al tiempo.

Para facilitar la lectura de los datos y no sobrecargar la representación gráfica, se ha separado en dos gráficas el experimento completo. De esta manera en la Figura 4-16 podemos ver la representación de la muestra de referencia, M1 y M2 mientras que en la Figura 4-17 quedan representadas M3, M4, M5 y M6.

Comprobando los resultados obtenidos, M2 y M6 obtienen mejores resultados que el resto de muestras almacenando mejor el calor siendo M6 (10 % RT18, 10 % RT35) el mortero de cal que mejor la almacena. Esto se debe a que es la que más tarda en enfriarse y a que es la que tiene mayor temperatura al final del ensayo tanto en la base (19,2 °C) como en la parte alta (20,4 °C). Sin embargo, en el resto de morteros ninguno supera los 18 °C en la base y, en la parte alta, el único que lo iguala es M2 con 20,5 °C.

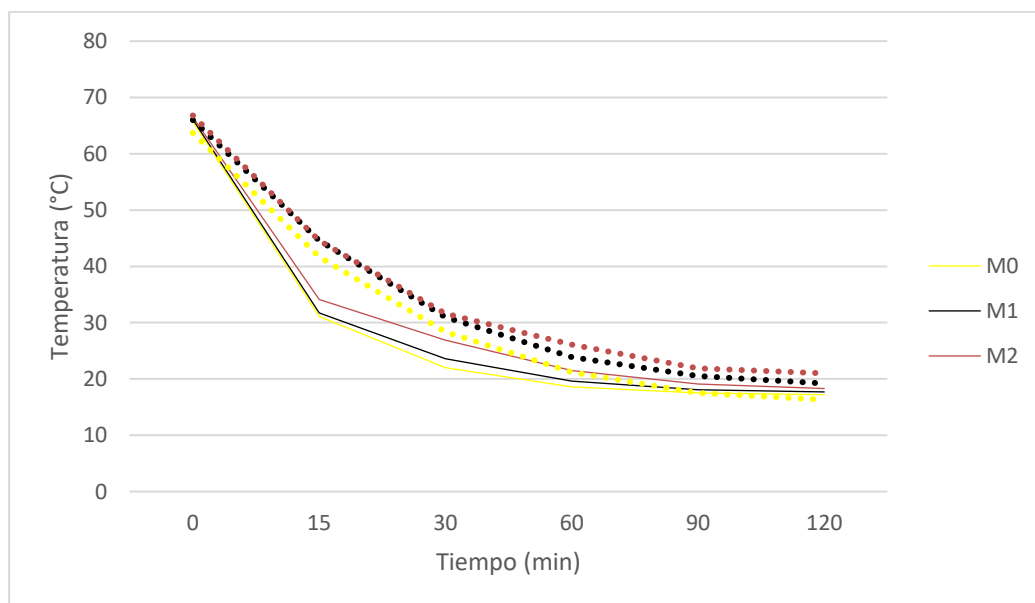


Figura 4-16 Ensayo de enfriamiento M0-M1-M2

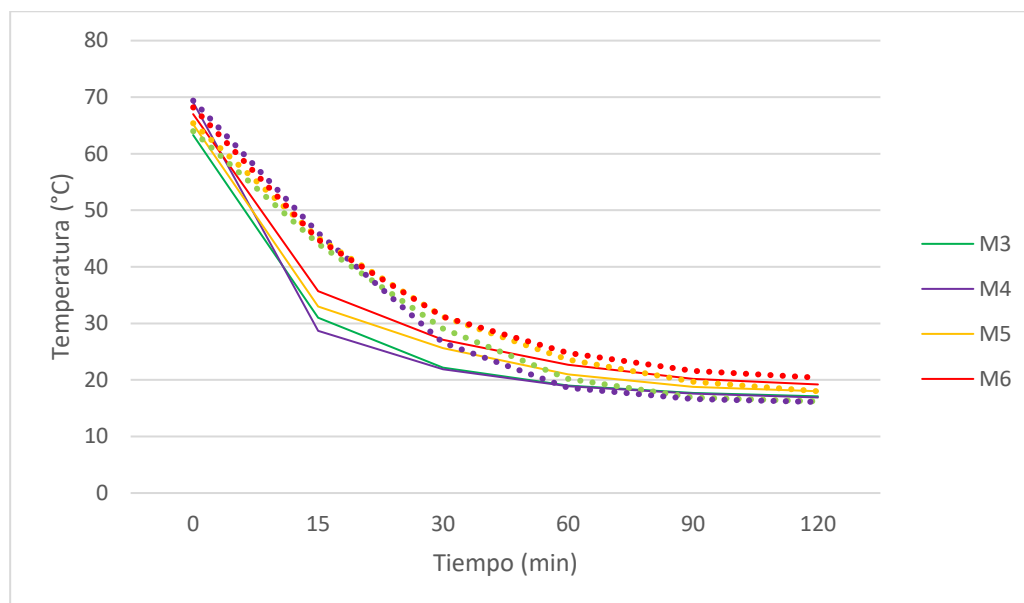


Figura 4-17 Ensayo de enfriamiento M3-M4-M5-M6

Comprobando los resultados obtenidos, M2 y M6 obtienen mejores resultados que el resto de muestras almacenando mejor el calor siendo M6 (10 % RT18, 10 % RT35) el mortero de cal que mejor la almacena. Esto se debe a que es la que más tarda en enfriarse y a que es la que tiene mayor temperatura al final del ensayo tanto en la base (19,2 °C) como en la parte alta (20,4 °C). Sin embargo, en el resto de morteros ninguno supera los 18 °C en la base y, en la parte alta, el único que lo iguala es M2 con 20,5 °C.

En las siguientes imágenes se muestra la evolución de la temperatura de las muestras durante la prueba realizada. Las fotos fueron tomadas con la cámara termográfica y son relativas al inicio del experimento (Figura 4-18), 60 minutos después de comenzar (Figura 4-19) y al finalizarlo (Figura 4-20):

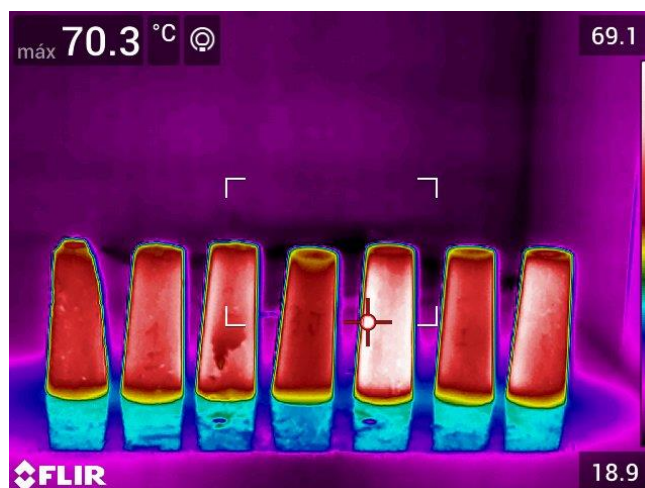


Figura 4-18 Fotografía térmica al inicio del ensayo de enfriamiento

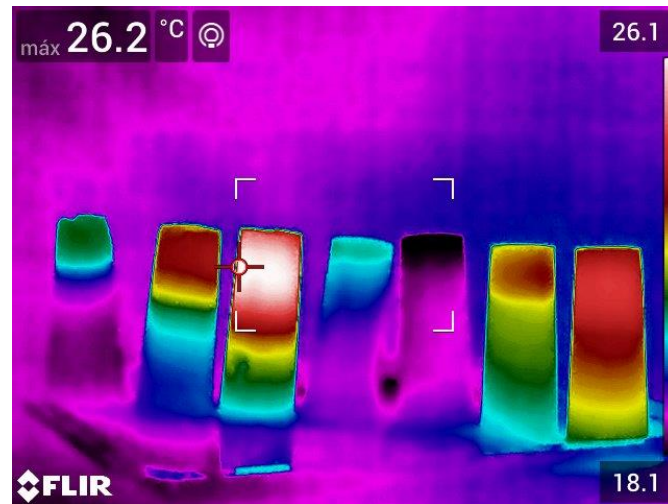


Figura 4-19 Fotografía térmica a mitad del ensayo de enfriamiento

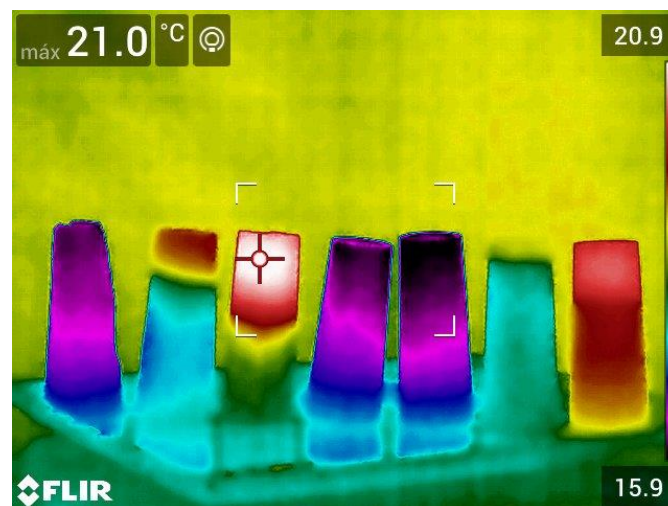


Figura 4-20 Fotografía térmica al finalizar el ensayo de enfriamiento

- **Ensayo de calentamiento**

En este ensayo se sigue exactamente el mismo procedimiento que en el apartado de ensayo de enfriamiento pero esta vez los morteros están a temperaturas bajo cero y el agua a 22,5 °C. Los morteros se mantuvieron en el congelador durante la misma duración. A pesar de ello hubo alguno que se enfrió menos que el resto como por ejemplo el mortero de referencia que partió de -1,8 °C en la base mientras que el resto lo hicieron a temperaturas inferiores a -7 °C.

En el momento en que se alcanzaron los 90 minutos de este experimento se realizó un cambio de agua ya que se había enfriado por completo.

También es importante señalar que a los 120 minutos de la prueba quedaron completamente deshechas las muestras M2 y M6 siendo impracticable su estudio. De esta manera se regeneró el agua fría acelerando el fin del ensayo que queda reflejado en las siguientes gráficas:

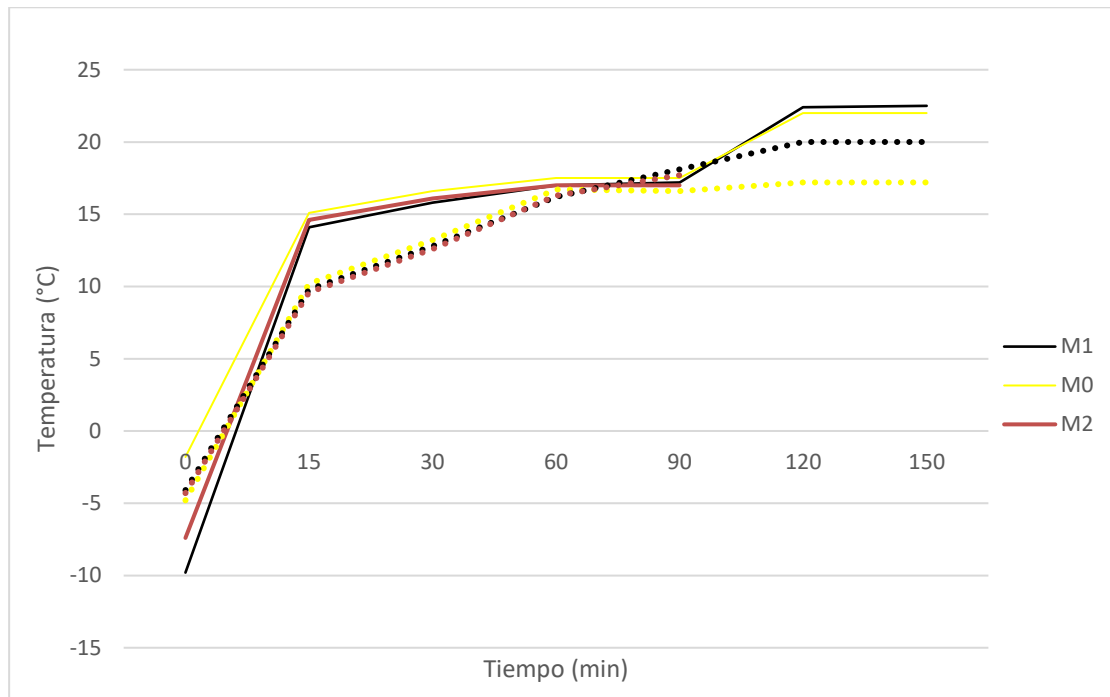


Figura 4-21 Ensayo de calentamiento M0-M1-M2

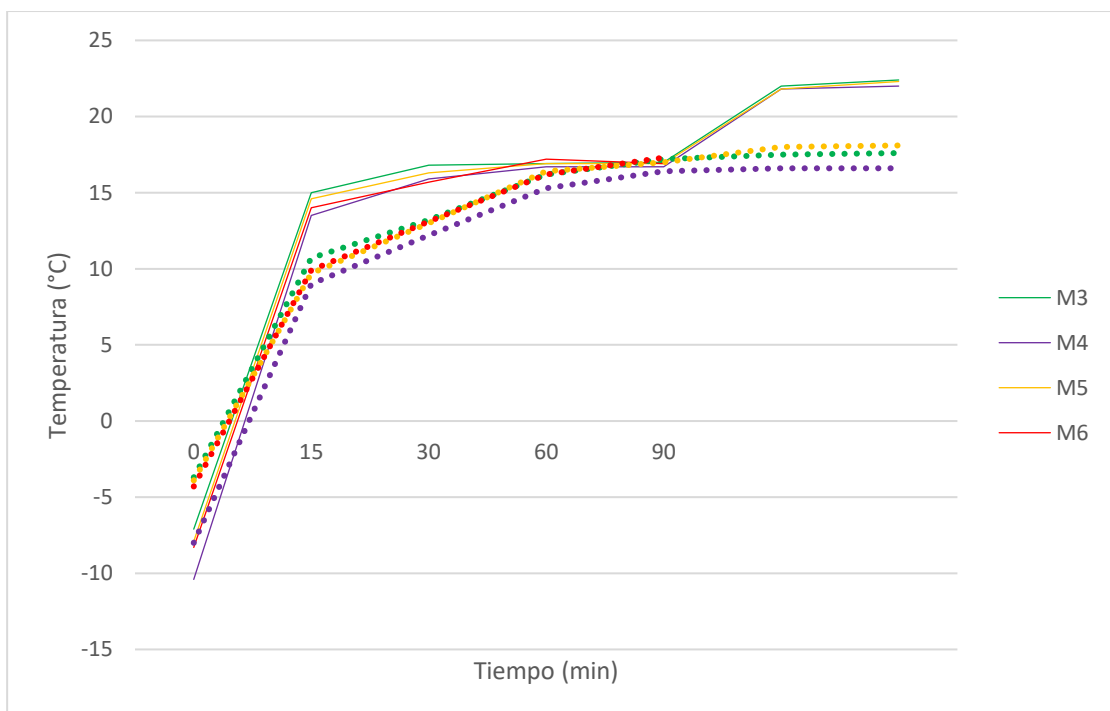


Figura 4-22 Ensayo de calentamiento M3-M4-M5-M6

Como se puede observar, la composición tanto M2 como M6 no presenta buenas propiedades de choque térmico, ya que se descomponen por completo.

Por otro lado, tanto M1 como M4 son los morteros que más resistencia muestran al calentamiento. En cuanto a la evolución de sus temperaturas en la base del mortero son prácticamente idénticas partiendo de una temperatura casi igual y finalizando ambos en una temperatura aproximada de 22 °C.

Su gran diferencia reside en la transmisión interna del calor. Comprobando las líneas discontinuas (temperatura de la parte alta del mortero) se obtiene como resultado que M4 se opone más a ser calentado que M1 con unas temperaturas finales de la parte superior de las muestras que termina a 16,6 °C en la M4 y 20 °C en la M1. Por ello, se determina que M4 (20 % RT18) reduce más la transmisión de calor en su interior y por ello es mejor que el resto de morteros. Gracias a su alto componente de PCM RT18 logra almacenar el frío debido a que su temperatura de fusión (18 °C) es más baja que el RT35 (35 °C).

Estas características hacen que el PCM RT18 sea muy eficiente en la conservación del frío, ya que puede mantener una temperatura constante durante períodos prolongados de tiempo, incluso si la temperatura exterior cambia. Por lo tanto, el PCM RT18 es una opción popular para aplicaciones de conservación del frío y en este ensayo el mortero M4 lo demuestra.

En las siguientes imágenes se muestra la evolución de la temperatura de los morteros durante la prueba realizada. Las fotos fueron tomadas con la cámara termográfica y son relativas al inicio del experimento (Figura 4-23), 60 minutos después de comenzar (Figura 4-24) y al finalizarlo (Figura 4-25):

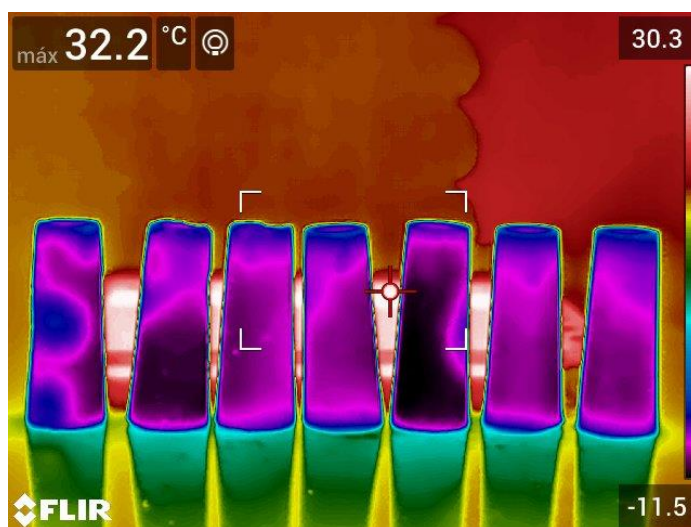


Figura 4-23 Fotografía térmica al inicio del ensayo de calentamiento

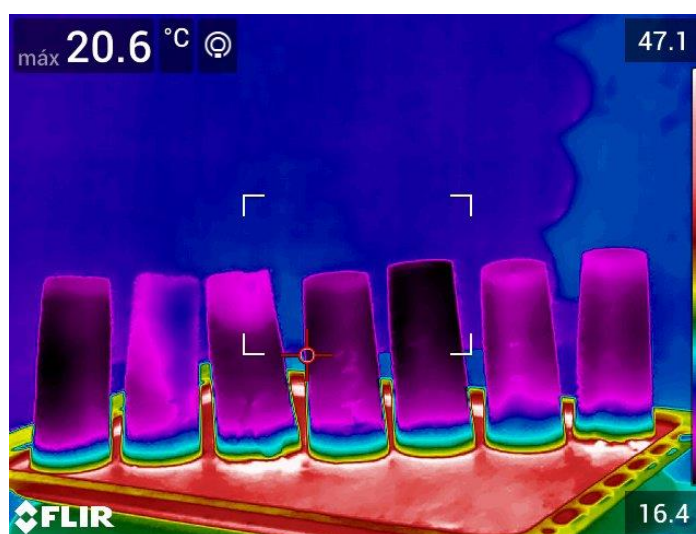


Figura 4-24 Fotografía térmica a mitad del ensayo de calentamiento

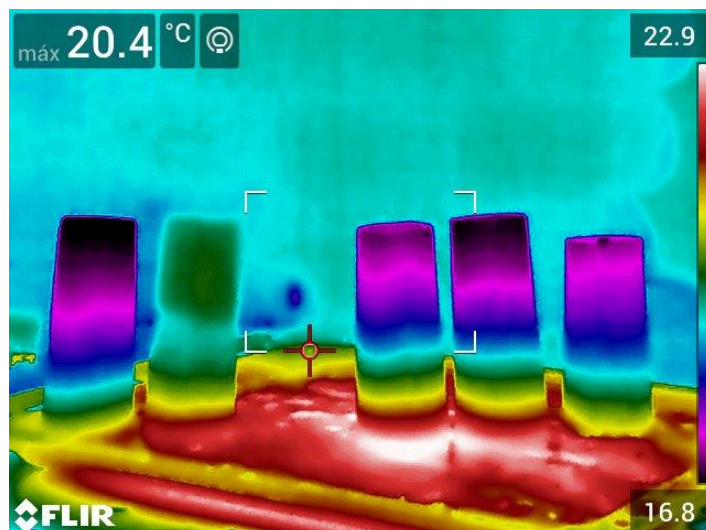


Figura 4-25 Fotografía térmica al finalizar el ensayo de calentamiento

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

A partir de los ensayos realizados se pueden obtener las diferentes conclusiones en relación a los resultados finales y objetivos fijados:

1. Los análisis de porosidad y capilaridad determinan que la muestra con mejor comportamiento es M1 (10 % PCM RT35). Esto deja ver que el PCM RT35 es el que mejor se adhiere a los poros del mortero de cal impidiendo que entren otros fluidos en ellos y, por lo tanto, aumentando su resistencia y durabilidad.
2. La exposición a sales del tipo NaCl descompone por completo todos los tipos de morteros de cal. Por otro lado, el análisis de carbonatación con fenolftaleína muestra que el mortero M1 (10 % PCM RT35) presenta menor carbonatación que el resto haciendo que sea el más duradero y el que menos mantenimiento necesite reduciendo el consumo energético y mejorando la seguridad de las construcciones.
3. Los análisis termogravimétricos demuestran que la muestra de referencia M0 es la que obtiene menor pérdida de peso mientras que la muestra M2 (20 % RT35) es la que almacena un mayor flujo de calor.
4. En cuanto al ensayo de calentamiento se demuestra que el mejor resultado lo obtiene M4 (20 % RT18) y, en enfriamiento M6 (10 % RT18, 10 % RT35).

Por lo tanto se concluye que el PCM que mejor almacena el frío es el RT18 mientras que el que mejor almacena el calor, por lo general, es el RT35. Esto demuestra las numerosas ventajas que obtienen las morteros de cal con PCM en su composición aumentando la durabilidad de las construcciones y consiguiendo un mayor confort térmico sin necesidad de incrementar el gasto energético.

5.2 Líneas futuras

El PCM (Material de Cambio de Fase) es un material que se ha utilizado en la construcción durante muchos años, especialmente en Europa y Asia, debido a su capacidad para ayudar a regular la temperatura interior de los edificios. El PCM se ha utilizado en una variedad de formas, desde el revestimiento de paredes hasta la creación de techos y pisos.

En el futuro, se espera que el PCM RT35 y RT18 sigan siendo populares en la construcción y remodelación de edificios con el fin de ahorrar energía y dinero. Algunas de las posibles líneas futuras que se pueden tomar incluyen:

1. Desarrollo de nuevos productos: Es probable que se sigan desarrollando nuevos productos que utilicen PCM RT35 y RT18 en combinación con otros materiales de construcción para mejorar aún más la eficiencia energética de los edificios. Por ejemplo, se podrían crear

materiales de construcción con propiedades de aislamiento térmico mejoradas que utilicen PCM RT35 y RT18 para regular la temperatura interior poniendo en práctica las conclusiones obtenidas de la realización de este trabajo.

2. Mayor uso en la construcción de edificios existentes: A medida que la conciencia sobre la sostenibilidad y la eficiencia energética continúe creciendo, se espera que se utilice cada vez más el PCM RT35 y RT18 en la renovación y remodelación de edificios existentes. Esto puede incluir el revestimiento de paredes, la creación de techos y pisos, así como la incorporación de materiales de PCM en otros elementos de construcción.
3. Integración con tecnologías inteligentes: El uso de tecnologías inteligentes, como sensores y sistemas de control de temperatura, está aumentando en la construcción de edificios. En el futuro, se espera que el PCM RT35 y RT18 se integren más con estas tecnologías para mejorar aún más la eficiencia energética de los edificios. Por ejemplo, se podrían crear sistemas de calefacción y refrigeración que utilicen PCM RT35 y RT18 para almacenar y liberar energía térmica según sea necesario.
4. Mayor aceptación en el mercado: A medida que los consumidores y los propietarios de edificios se vuelvan más conscientes de la eficiencia energética y los beneficios económicos que ofrece el uso de PCM RT35 y RT18 en la construcción y remodelación de edificios, es probable que su adopción en el mercado siga creciendo. Esto podría llevar a una mayor disponibilidad y reducción de costos, lo que a su vez podría impulsar aún más su adopción en la construcción de edificios.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] United Nations, «Transforming our world: the 2020 Agenda for Sustainable Development,» [En línea]. Available: <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld>. [Último acceso: 23 Enero 2023].
- [2] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, «Avance del inventario de emisiones de gases de efecto invernadero de España 1990-2018,» [En línea]. Available: [https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/inventario-emisiones-gases-efecto-invernadero-gei/Avance %20del %20Inventario %20de %20GEI %20de %20España %201990-2018_tcm30-514566.pdf](https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/inventario-emisiones-gases-efecto-invernadero-gei/Avance%20del%20Inventario%20de%20GEI%20de%20España%201990-2018_tcm30-514566.pdf). [Último acceso: 24 Enero 2023].
- [3] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Libro de la Energía en España, Madrid, 2019.
- [4] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Plan Nacional Integrado de Energía y Clima, Madrid, 2021.
- [5] International Energy Agency, «International Energy Agency,» [En línea]. Available: <https://www.iea.org/>. [Último acceso: 24 Enero 2023].
- [6] «El Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030,» [En línea]. Available: <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/planificacion-y-estrategias/Plan-Nacional-Integrado-de-Energia-y-Clima.aspx>. [Último acceso: 8 Febrero 2023].
- [7] «European Commission. Joint Research Centre. Institute for Energy and Transport., Energy efficiency status report 2012: electricity consumption and efficiency trends in the EU 27.,» [En línea]. Available: <https://data.europa.eu/doi/10.2788/37564>. [Último acceso: 14 Febrero 2023].
- [8] Organización de las Naciones Unidas, «Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible,» 2023.
- [9] I. S. & C. Sebarchievici, «A Comprehensive Review of Thermal Energy Storage,» *MDPI*, 2018.

- [10] J. N. A. G.-S. Oliver, «Clasificación y selección de materiales de cambio de fase según sus características para su aplicación en sistemas de almacenamiento de energía térmica,» *Materiales de construcción*, 2012.
- [11] S. D. y. X. L. I. Dincer, «Performance analyses of sensible heat storage systems for thermal applications,» *Int. J. Energy Res.*, 1997.
- [12] S. P. P. M. Hakeem Niyas, «Performance investigation of a lab-scale heat storage prototype - Numerical results,» *Energy Convers*, 2017.
- [13] PETROENERGÍA, «Materiales de cambio de fase como mecanismos de eficiencia energética para industria y construcción,» [En línea]. Available: [https://www.petroenergia.info/post/materiales-de-cambio-de-fase-como-mecanismos-de-eficiencia-energ %C3 %A9tica-para-industria-y-construcci %C3 %B3n](https://www.petroenergia.info/post/materiales-de-cambio-de-fase-como-mecanismos-de-eficiencia-energ%C3%A9tica-para-industria-y-construcci%C3%B3n). [Último acceso: 19 Marzo 2023].
- [14] D. A. Arranz, «Yeso aditivado con materiales de cambio de fase para su aplicación en rehabilitaciones energéticas en interiores de edificios protegidos,» *Congreso Nacional del Medio Ambiente (CONAMA)*, 2014.
- [15] K. P. Kinga Pielichowska, «Phase change materials for thermal energy storage,» *Progress in Materials Science*, Agosto 2014.
- [16] B. Z. Q. M. Fuwei Yang, «Study of Sticky Rice-Lime Mortar Technology for the Restoration of Historical Masonry Construction,» *ACS Publications*, 2010.
- [17] L.-C. Calle, «Determinación de la composición de morteros endurecidos de cal, híbridos y de cemento portland,» Argentina, 2011.
- [18] «UNICMALL,» [En línea]. Available: <https://www.unicmall.com/es/empresa/la-cal/16-el-ciclo-de-la-cal>. [Último acceso: 1 Febrero 2023].
- [19] «PubChem,» [En línea]. Available: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Cal-Dolomita>. [Último acceso: 19 Marzo 2023].
- [20] A. M. P. P. J. G. C. José Ignacio Álvarez Galindo, «Historia de los morteros,» *Dialnet*, 1995.
- [21] J. F. C. Iván de Rosario Amado, «Alteración de las rocas y otros materiales de construcción en los monumentos. Técnicas de conservación,» Universidad de Vigo.
- [22] «Portland Cement Association,» [En línea]. Available: <https://www.cement.org/cement-concrete-basics/types-of-cement>. [Último acceso: 19 Marzo 2023].
- [23] P. D. J.M. Illston, *Construction Materials, Their Nature and Behaviour*.
- [24] «Canales secotriales,» [En línea]. Available: <https://www.interempresas.net/Construccion/Articulos/37082-Los-aridos.html>. [Último acceso: 20 Febrero 2023].
- [25] C. Luaces, «Canales sectoriales: Los áridos,» 22 Enero 2010. [En línea]. Available: <https://www.interempresas.net/Construccion/Articulos/37082-Los-aridos.html>. [Último acceso: 4 Febrero 2023].
- [26] O. C. Vázquez, *Morteros de cal : aplicación en el patrimonio histórico*, Universidad de Granada, 2002.

- [27] M. R. J. E. C. U. G. y. O. L. M. J. Ertelt, *Bacterial Additives Improve the Water Resistance of Mortar*, ACS Sustain. Chem. Eng., 2020.
- [28] R. M. U. Valles, «Estudio y análisis de la utilización de la cal para el patrimonio arquitectónico.,» Valencia, 2015.
- [29] «Lancaster LimeWorks,» [En línea]. Available: <https://lancasterlimeworks.com/learning-center/types-of-lime/>. [Último acceso: 16 Febrero 2023].
- [30] «Phase Change Material - an overview,» Science Direct Topics, [En línea]. Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/phase-change-material>. [Último acceso: 5 Febrero 2023].
- [31] K. S. S. D. Sharma, «Latent Heat Storage Materials and Systems: A Review,» *International Journey of Green Energy*, vol. 2, pp. 1-56, 2005.
- [32] M. C. B. Garcés, «Evaluación de impacto ambiental mediante análisis de ciclo de vida (ACV) de la incorporación de materiales de cambio de fase (PCM) en edificación.,» Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 2014/2015.
- [33] S. Rathore, «Enhanced thermophysical properties of organic PCM through shape stabilization for thermal energy storage in buildings: A state of the art review,» *Energy Build*, 2021.
- [34] N. G.-S. Oliver, «Clasificación y selección de materiales de cambio de fase según sus características para su aplicación en sistemas de almacenamiento de energía térmica,» *Mater. Constr.*, 2012.
- [35] d. A. da Cunha, «Phase change materials and energy efficiency of buildings: A review of knowledge.,» de *J. Ensergy Storage*, 2020.
- [36] «Phase Change Micro - Capsule Paraffin Wax PCM For Intelligence Attenuation,» [En línea]. Available: <https://www.andores.com/sale-9516717-phase-change-micro-capsule-paraffin-wax-pcm-for-intelligence-attenuation.html>. [Último acceso: 20 Febrero 2023].
- [37] F. S. A. K. Magendran, «Synthesis of organic phase change materials (PCM) for energy storage applications: A review,» *ScienceDirect*, vol. 20, 2019.
- [38] F. F. y. P.-H. B. F. Souayfane, «Phase change materials (PCM) for cooling applications in buildings: A review,» *Energy Build*, 2016.
- [39] V. V. T. y. D. Buddhi, «PCM thermal storage in buildings: A state of art,» *Renew. Sustain. Energy Rev*, 2007.
- [40] F. Lladó, «Análisis del comportamiento al fuego de materiales de construcción con adición de pcm,» Septiembre 2012. [En línea]. Available: <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/16954>. [Último acceso: 5 Febrero 2023].
- [41] A. G. H. G. A. G. F. L. C. G. S. Ushak, «Thermophysical characterization of a by-product from the non-metallic industry as inorganic PCM,» *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 2015.
- [42] T. L. Duan, «A numerical study of solidification of n-hexadecane based on the enthalpy formulation,» *J. Mater. Process. Technol.*, 2002.

- [43] K. P. L. R. Y. H. D. Y. J. Y. P. Zhang, «Preparation, thermal performance and application of shape-stabilized PCM in energy efficient buildings,» *Energy and Buildings*, vol. 38, pp. 1262-1269, 2006.
- [44] V. A. Z. Vargas, «Morteros acumuladores con parafinas microencapsuladas para el aprovechamiento de la energía solar en suelos radiantes,» Madrid, 2013.
- [45] M. J. Zhang, «Development of a thermally enhanced frame wall with phase change materials for on-peak air conditioning demand reduction and energy savings in residential buildings,» *International Journal of Energy Research*, 2005.
- [46] U. y. K. Hawlader, «Micro-encapsulated PCM thermal energy storage system,» 2003.
- [47] R. B. S. F. y. D. G. D. Juárez, *Estudio de materiales con cambio de fase (PCM) y análisis SEM de micro (PCM)*, Valencia: Área de Innovación y Desarrollo S.L, 2012.
- [48] «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,» [En línea]. Available: <https://zaguan.unizar.es/record/48555#>. [Último acceso: 5 Febrero 2023].
- [49] U.-E. 1936:2007, «Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total».
- [50] «UNE-EN 1936:2007: “Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total”,» [En línea]. Available: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0038621>. [Último acceso: 7 Marzo 2023].
- [51] «Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad,» 16 Febrero 2023. [En línea]. Available: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0010084>.
- [52] R. P. S. Mosquera, «Capillary Rise in Granitic Rocks: Interpretation of Kinetics on the Basis of Pore Structure,» *J. Colloid Interface Science*, 2000.
- [53] UNE-EN 1015-18:2003, «Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 18: Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido.».
- [54] «UNE-EN 12370:2020 Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la cristalización de sales,» [En línea]. Available: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0064854>. [Último acceso: 16 Febrero 2023].
- [55] A. A. F. C. a. R. P. G. Mancuso, «Use of phenolphthalein test for monitoring the carbonation process of lime mortars,» *Materials and Structures*, vol. 47, n° 11, pp. 1913-1923, 2014.
- [56] «FLIR, “Guía sobre termografía para aplicaciones en edificios y energías renovables”,» 2011. [En línea]. Available: http://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/T820325/T820325_ES.pdf. [Último acceso: 14 Marzo 2023].
- [57] J. Rodríguez y V. Fernández, *Cómo redactar el estado del arte de un trabajo*, Editorial Genios, 2010.

- [58] International Energy Agency, 2018.
- [59] I. Sarbu.
- [60] S. A. K. M. M. V. W. K. A. S. N. R. R. K. Magendra, «ScienceDirect,» Octubre 2019. [En línea].
- [61] «LABSYS evo ATG STA DTA / DSC. par Setaram. Une marque du Groupe KEP Technologies - PDF Free Download,» [En línea]. Available: <https://docplayer.fr/90106642-Labsys-evo-atg-sta-dta-dsc-par-setaram-une-marque-du-groupe-kep-technologies.html>. [Último acceso: 25 Febrero 2023].
- [62] «Energía futura,» [En línea]. Available: <https://energeticafutura.com/blog/el-verdadero-desglose-del-recibo-de-la-luz/>. [Último acceso: 24 Enero 2023].
- [63] «Laurentia technologies,» [En línea]. Available: <https://www.laurentia.es/2016/04/11/pcms-para-regular-la-temperatura/>. [Último acceso: 15 Febrero 2023].
- [64] «Huellas de arquitectura,» [En línea]. Available: <https://huellasdearquitectura.com/2015/04/16/cuanto-y-que-tipo-de-energia-consumen-nuestros-hogares/consumo-unitario-segun-tipo-vivienda/>. [Último acceso: 15 Febrero 2023].

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

El uso de materiales de cambio de fase (PCM) en los morteros para la construcción tiene diversas implicaciones sociales, económicas y ambientales.

En cuanto a las implicaciones sociales, el uso de PCM puede ayudar a mejorar el confort térmico en los edificios manteniendo una estabilidad térmica en el interior, lo que puede mejorar la calidad de vida de las personas que los habitan. Esto es especialmente importante en regiones donde las temperaturas pueden ser extremas, ya que el uso de PCM puede ayudar a reducir la necesidad de sistemas de calefacción y refrigeración, y por lo tanto, mejorar la eficiencia energética de los edificios. Además, la reducción del consumo de energía puede traducirse en una disminución de los costos de energía para los usuarios, lo que podría mejorar la accesibilidad a la vivienda con la consecuente mejora en calidad de vida.

Además, otra de las implicaciones sociales es que el uso de PCM también puede mejorar la durabilidad y la vida útil de los edificios, lo que puede tener un impacto positivo en la seguridad de las personas que los habitan. Estos materiales de cambio de fase hacen que los edificios puedan ser más resistentes a las perturbaciones ambientales, como a los desastres naturales, y por lo tanto, pueden ser más seguro y confiables para sus habitantes. También es importante remarcar que los edificios que utilizan PCM pueden tener una mejor resistencia al calor y al frío extremos, lo que puede ayudar a proteger a las personas de condiciones ambientales peligrosas.

En términos económicos, el uso de PCM podría tener un impacto significativo en la industria de la construcción. Si los morteros que utilizan PCM se vuelven más populares, es posible que se generen nuevos empleos en la fabricación y distribución de estos materiales. Además, la reducción en los costes de energía podría traducirse en ahorros significativos a largo plazo para los usuarios de los edificios.

En relación con la economía del usuario se vería afectada positivamente ya que disminuiría la necesidad de utilizar calefacciones y aire acondicionado para tratar de lograr un confort térmico en el interior del inmueble.

Por último, en términos ambientales, como ya se ha mencionado anteriormente el uso de PCM podría ayudar a reducir el consumo de energía y, por lo tanto, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con la generación de energía. Además, el uso de materiales de cambio de fase renovables podría tener un impacto positivo en la reducción de residuos y la gestión sostenible de los recursos naturales.

En resumen, el uso de PCM en los morteros para la construcción puede tener una serie de implicaciones positivas para la sociedad, la economía y el medio ambiente, lo que hace que sea un área de investigación y desarrollo muy interesante para la industria de la construcción.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

El uso de materiales de cambio de fase en los morteros de las viviendas puede tener diversas implicaciones éticas y sociales que es importante considerar.

En primer lugar, desde un punto de vista ético, es importante asegurarse de que estos materiales sean seguros para la salud humana y el medio ambiente. Los materiales de cambio de fase pueden estar compuestos de sustancias químicas que podrían ser tóxicas o dañinas para las personas o el entorno en el que se utilizan. Por lo tanto, se debe realizar una evaluación rigurosa de los materiales antes de su uso para garantizar que sean seguros.

En segundo lugar, desde un punto de vista social, es importante considerar el coste de estos materiales y si su uso puede exacerbar la brecha entre las personas que pueden pagarlos y las que no. Si el coste de estos materiales es demasiado alto, puede limitar su uso a personas de mayores ingresos, lo que podría agravar las desigualdades en el acceso a viviendas seguras y de calidad.

En tercer lugar, es importante considerar la disponibilidad de estos materiales y su impacto en la economía local. Si estos materiales no están disponibles localmente, pueden tener que ser importados, lo que podría tener un impacto negativo en la economía local y aumentar el coste para los consumidores provocando un desequilibrio en su economía con respecto a la de aquellos que no necesitan importarlos.

En resumen, el uso de materiales de cambio de fase en los morteros de las viviendas puede tener implicaciones éticas y sociales importantes que deben ser consideradas cuidadosamente. Es importante asegurarse de que estos materiales sean seguros para la salud humana y el medio ambiente, y de que su coste y disponibilidad no exacerben las desigualdades socioeconómicas.