



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Estudio de la modificación de las propiedades al incorporar
materiales de cambio de fase a morteros*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Carlos Miguel Hertfelder Chisvert

DIRECTORES: Jorge Feijoo Conde
Miguel Ángel Álvarez Feijoo

CURSO ACADÉMICO: 2020-2021

UniversidadeVigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Estudio de la modificación de las propiedades al incorporar
materiales de cambio de fase a morteros*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

El cambio climático supone uno de los principales retos a los que se enfrenta la sociedad moderna. Desde el punto de vista que concierne al sector de la construcción, la mejora de la eficiencia energética de los edificios, a través de aplicación de nuevos sistemas aislantes, permite incrementar el ahorro energético hasta porcentajes superiores al 60%. Este ahorro, además de ocasionar una mejora en el confort interior, contribuye a reducir las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera. La adaptación de las construcciones, en términos de eficiencia energética, frente a los retos medioambientales que se le plantean a la sociedad es imprescindible para alcanzar la sostenibilidad del medio ambiente. Actualmente, en construcciones modernas, la eficiencia energética se consigue mediante la instalación de sistemas aislantes en las fachadas que preserven la inercia térmica. Sin embargo, en construcciones anteriores a los años 50, especialmente en aquellas catalogadas como patrimonio histórico, la falta de espesor disponible en las fachadas no permite llevar a cabo su instalación, por lo que es necesario buscar nuevas soluciones o alternativas.

Este Trabajo Fin de Grado (TFG) se ha centrado en analizar y evaluar, tanto desde el punto de vista físico como energético, el comportamiento de un mortero de cal con diferentes proporciones de material de cambio de fase (PCM, Phase Change Material) a fin de evaluar su idoneidad no sólo como elemento estructural en un edificio sino también como alternativa para la mejora energética de la construcción.

Durante la fase experimental se ha caracterizado y evaluado el mortero de cal mediante diferentes ensayos (dureza, termogravimétrico y de porosidades accesibles entre otros), para estudiar la variación de propiedades físicas, mecánicas y térmicas. Al incorporar el PCM al mortero de cal se ha conseguido aumentar la capacidad de almacenamiento de calor, como era de esperar. Un aspecto destacado ha sido la modificación de la estructura porosa del mortero al incorporar el PCM. En una baja proporción del material de cambio de fase se incrementa la porosidad del mortero, tanto accesible como capilar. Por el contrario, en una proporción mayor de PCM el efecto es contrario, ya que desaparecen familias de poros de menor diámetro. Esto tiene su efecto en las propiedades mecánicas. En materiales con menor porosidad se incrementa la dureza.

PALABRAS CLAVE

Mortero, material de cambio de fase, sostenibilidad, eficiencia, construcción

AGRADECIMIENTOS

Durante este largo periodo de formación en la Escuela Naval han sido muchas las personas las que me han apoyado y motivado en esta carrera de fondo. Agradecer particularmente a:

- A mi hermana Alejandra, que desde siempre ha estado en primera línea ayudándome y apoyándome, en los buenos y malos momentos, siendo un pilar fundamental en el inicio de mi carrera profesional, así como en la personal.
- A mis padres, Paqui y Carlos, quienes siempre han confiado en mí y me han apoyado en cada una de las decisiones que he tomado.
- A Alicia, por apoyarme y acompañarme a pesar de las condiciones en las que hemos vivido estos dos últimos años. Siendo también un pilar fundamental en los malos y buenos momentos.
- A mis amigos desde la infancia, Maza, Nacho, Ferraz y Víctor por haber sido un placer compartir desde los 3 años todas las vivencias y este viaje en el que nos embarcamos ya hace cinco años.
- A mis amigos y compañeros, que a distancia o en la convivencia siempre han estado acompañándome en este camino.
- A mis tutores, por su interés, trabajo continuo y ayuda incondicionada desde el principio hasta el final del trabajo.

Finalmente, me gustaría agradecer al Laboratorio de Petrofísica, dirigido por la doctora Mónica Álvarez de Buergo, y al Grupo de Investigación de Petrología Aplicada a la Conservación del Patrimonio, dirigido por el doctor Rafael Fort, ambos pertenecientes al Instituto de Geociencias de Madrid (IGEO CSIC-UCM) y al programa TopHeritage (P2018/NMT-4372) de la Comunidad de Madrid que financió parte de los análisis efectuados en este proyecto.

A todos, muchas gracias.

CONTENIDO

Contenido	I
Índice de Figuras	III
Índice de Tablas.....	VI
1 Introducción y objetivos	1
1.1 Introducción al trabajo	1
1.2 Contextualización.....	3
1.3 Objetivos	5
1.4 Orden de memoria.....	6
2 Estado del arte	7
2.1 Almacenamiento de energía térmica.....	7
2.2 Morteros	8
2.2.1 Definición y propiedades	8
2.2.2 Tipos de morteros	11
2.3 Materiales de cambio de fase (PCM).....	15
2.3.1 Definición	15
2.3.2 Clasificación de PCM	16
2.3.3 Métodos de incorporación de PCM	18
2.3.4 Aplicaciones de los PCM.....	20
3 Desarrollo del TFG.....	22
3.1 Materiales y métodos	22
3.1.1 Materiales empleados	22
3.1.2 Selección de materiales de cambio de fase.....	23
3.1.3 Realización de la muestra	24
3.2 Metodología	26
3.2.1 Análisis de composición química y mineralógica	26
3.2.1 Estructura porosa	29
3.2.2 Propiedades de resistencia mecánica	36
3.2.3 Capacidad de retención de calor mediante cámara termográfica	38
4 Resultados	40
4.1 Grado de carbonatación	40
4.2 Caracterización de los morteros de cal	52
4.2.1 Estructura porosa: porosidades accesibles, capilaridad y tortuosidad.	52

4.3 Propiedades mecánicas	60
4.3.1 Resultados de los ensayos de dureza superficial por impacto	60
4.3.2 Resultados ensayo a compresión uniaxial	60
4.4 Resultados cámara termográfica	63
5 Conclusiones y líneas futuras	68
5.1 Conclusiones	68
5.2 Líneas futuras	68
6 Bibliografía.....	70
Anexo I: Selección de materiales	76
Anexo II: Contenido del segundo anexo	77
Anexo III: Contenido del segundo anexo	78
Anexo IV: Contenido del segundo anexo.....	79
Anexo V: Porosidad capilar.....	81
Anexo VI: Listado relación muestra y ensayos	83
Anexo VII: Ficha técnica del aparato de ensayo universal	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Consumo de energía en Ktep (tonelada equivalente de petróleo) en el sector de la residencial (datos obtenidos del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la energía (IDEA)).	2
Figura 1-2 Consumo de energía en el sector de la construcción (Fuente: IDEA).	2
Figura 1-3 Comparativa de emisiones de CO ₂ en 2018-2019 [9]	4
Figura 1-4 Evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero [9].	4
Figura 1-5 Variación temperatura en fachada en enero de 2017 [10].	5
Figura 1-6 Variación de temperatura en fachada en junio de 2017 [10].	5
Figura 2-1 Tipos de áridos según granulometría [15].	9
Figura 2-2 Ciclo de obtención de cal aérea [12].	14
Figura 2-3 Ciclo de cal hidráulica [12].	15
Figura 2-4 Clasificación de los materiales de cambio de fase según Abhat [29]	16
Figura 2-5 Clasificación de los materiales de cambio de fase sólido-líquido [30].	17
Figura 2-6 Relación del punto de fusión y entalpía para selección de PCM según su aplicación [31].	18
Figura 2-7 Funcionamiento de PCM en microencapsulado [32].	19
Figura 2-8 Proceso de cambio de fase en cápsulas con PCM [33].	20
Figura 3-1 Fotografía de las diferentes geometrías de probetas utilizadas sobre escala real en cm.	22
Figura 3-2 Pérdida de masa analizada mediante TG [45].	26
Figura 3-3 Ganancia de masa analizada mediante TG [45]	26
Figura 3-4 Ciclo de tres tramos programado en el TG.	27
Figura 3-5 . Equipo Labsys Evo 1180 usado para programar ciclo en el TG para analizar variación de masa.	28
Figura 3-6 Muestras de mortero. De izquierda a derecha PCM 10%, PCM 5% y sin PCM.	29
Figura 3-7 Ensayo de porosidad capilar con compresor para hacer el vacío dentro de la cubeta.	30
Figura 3-8 Ensayo de absorción . Se muestran nueve muestras en inmersión.	31
Figura 3-9 Ensayo de desorción de las nueve muestras analizadas.	31
Figura 3-10 Equipo AutoPore IV 9500 usado en el ensayo de porosimetría de Hg [49].	32
Figura 3-11 Ensayo porosidad capilar.	33
Figura 3-12 WP 300 (Gunt Hamburg): ensayo de materiales a compresión.	37
Figura 3-13 Roturas satisfactorias según Norma UNE-EN 12390-3:2020 [59]	37
Figura 3-14 Roturas no satisfactorias según Norma UNE-EN 12390-3:2020 [59]	38
Figura 3-15 Ensayo de enfriamiento de muestras mediante cámara termográfica FLIR.	39
Figura 4-1 Ejemplo de gráfica del PCM10(14) para interpretación de leyenda colores TG.	41
Figura 4-2 Resultado análisis termogravimétrico muestra con 5% de PCM a los 14 días de curación.	42

Figura 4-3 Evolución grado de carbonatación de las tres muestras analizadas durante 28 días.....	42
Figura 4-4 Resultado variación masa por análisis TG: muestra sin PCM, día 7.	43
Figura 4-5 Resultado variación masa por análisis TG: muestra con 5% de PCM, día 7.	44
Figura 4-6 Resultado variación masa por análisis TG: muestra con 10% de PCM, día 7.	45
Figura 4-7 Resultado variación masa por análisis TG: muestra sin PCM, día 14.	46
Figura 4-8 Resultado variación masa por análisis TG: muestra con 5% de PCM, día 14.	47
Figura 4-9 Resultado variación masa por análisis TG: muestra con 10% de PCM día 14.	48
Figura 4-10 Resultado variación masa por análisis TG: muestra sin PCM, día 28.	49
Figura 4-11 Resultado variación masa por análisis TG: muestra con 5% de PCM día 28.	50
Figura 4-12 Resultado variación masa por análisis TG: muestra con 10% de PCM, día 28.	51
Figura 4-13 Muestras de mortero tras aplicar fenolftaleína (a la izquierda muestra de 10% de PCM, en el centro muestra de 5% de PCM y a la izquierda muestra de referencia).	51
Figura 4-14 Muestras de mortero tras aplicar fenolftaleína a los 28 días de curado.	52
Figura 4-15 Distribución porosimétrica obtenida mediante ensayo de porosimetría de inyección de mercurio (Hg) de la muestra a) referencia, b) PCM 5% y c) PCM 10%.	54
Figura 4-16 Gráficas superpuestas de volumen poroso incremental respecto al tamaño de los poros. ...	55
Figura 4-17 Curva de absorción de agua de las tres muestras analizadas representadas en función del contenido de agua absorbida (Wt) frente al tiempo en horas.....	56
Figura 4-18 Curva de desorción de agua de las tres muestras analizadas representadas en función del contenido de agua absorbida (Wt) frente al tiempo en horas.....	56
Figura 4-19 Grado de saturación (Wt) respecto al tiempo ($\text{min}^{0.5}$) de las muestras de referencia, 10% de PCM y 5% de PCM.....	58
Figura 4-20 Resumen resultados de ensayo de ultrasonidos y anisotropía.....	59
Figura 4-21 Roturas no satisfactorias de muestras con un 10% de PCM.	61
Figura 4-22 Roturas no satisfactorias (a la izquierda rotura muestra de 5% de PCM y a la derecha muestra de referencia).....	62
Figura 4-23 Gráfica de los perfiles de perforación. Condiciones de perforación: velocidad de rotación de 600 rpm y velocidad de avance de 10mm/min.....	62
Figura 4-24 A la izquierda muestras calentadas en la estufa (izquierda muestra sin CPM, central muestra con 10% de PCM y en la derecha muestra con 5% de PCM). A la derecha agua enfriada a 1,7°C).....	63
Figura 4-25 Muestras tras incorporar agua a 1,7°C cubriendo 3 mm sobre la base de la muestra.	63
Figura 4-26 Representación de la variación de temperatura durante el ensayo calor-frío.....	64
Figura 4-27 Ensayo calor-frío: a la izquierda muestra totalmente fría a temperatura ambiente, muestra central de 10% tras 1 hora aún mantiene calor y a la derecha muestra de 5% con temperatura por encima de ambiente.	65
Figura 4-28 Ensayo frío-calor: a la izquierda muestras enfriadas a 4,3°C, a la derecha agua calentada a 34°C.	65

Figura 4-29 Ensayo frío-calor tras incorporar agua caliente (a la izquierda muestra de 5%, en el centro muestra de 10% y a la derecha muestra de referencia).	65
Figura 4-30 Representación de la variación de temperatura durante el ensayo de frío-calor.	66
Figura 4-31 Transición durante la transmisión de calor del agua a las muestras enfriadas.	67
Figura 4-32 Muestras a temperatura ambiente (izquierda muestra con 5% de PCM, central muestra con 10% de PCM y derecha muestra sin PCM).	67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Ventajas y desventajas principales entre mortero de cal y yeso [20].	12
Tabla 2-2 Resistencia mínima de los morteros tipo.	12
Tabla 2-3 Dosificaciones según norma NBE FL-90.	13
Tabla 2-4. Comparativa PCM orgánicos e inorgánicos [11]	18
Tabla 3-1 Dosificación mortero de cal basada en la relación 1:3.	23
Tabla 3-2 Resultados del estudio gravimétrico para hallar el contenido de agua.	23
Tabla 3-3 Comparativas características principales de los PCM.	23
Tabla 3-4 Relación ensayos realizados según geometría.	25
Tabla 4-1 Resultados variación de masa de la muestra de referencia a los 7 días de curado.	43
Tabla 4-2 Resultados variación de masa de la muestra con 5% de PCM a los 7 días de curado.	44
Tabla 4-3 Resultados variación de masa de la muestra con 10% de PCM a los 7 días de curado.	45
Tabla 4-4 Resultados variación de masa de la muestra de referencia a los 14 días de curado.	46
Tabla 4-5 Resultados variación de masa de la muestra con 5% de PCM a los 14 días de curado.	47
Tabla 4-6 Resultados variación de masa de la muestra con 10% de PCM a los 14 días de curado.	48
Tabla 4-7 Resultados variación de masa de la muestra de referencia a los 28 días de curado.	49
Tabla 4-8 Resultados variación de masa de la muestra con 5% de PCM a los 28 días de curado.	50
Tabla 4-9 Resultados variación de masa de la muestra con 10% de PCM a los 28 días de curado.	51
Tabla 4-10 Principales parámetros obtenidos durante los ensayos para caracterizar los morteros de cal.	52
Tabla 4-11 Contenido de agua en saturación (Ws en %) y grado de saturación por inmersión en función del tiempo (Wt, en %).	57
Tabla 4-12 Contenido de agua en saturación (Ws, en %) y grado de saturación (Wt, en %) por capilaridad en función del tiempo.	58
Tabla 4-13 Parámetros principales de las propiedades mecánicas.	60
Tabla 4-14 Enfriamiento: evolución de la temperatura de las muestras tras incorporar el agua fría.	64
Tabla 4-15 Evolución temperatura ensayo frío-calor.	66

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción al trabajo

Hoy en día nos encontramos en la búsqueda de una sostenibilidad y reducción de la contaminación a través de la tecnología, el uso de energías renovables y la eficiencia energética, con el fin de frenar el cambio climático provocado por el ser humano con un modelo energético irresponsable, consumiendo más recursos de los necesarios para una satisfacción de las necesidades de nuestro modelo de vida actual.

A su vez, nos vemos sumidos en una sociedad en la que se está incrementando el consumo energético por encima de nuestras posibilidades y limitaciones actuales, dando lugar a una insostenibilidad medioambiental, así como a una sobreexplotación de los recursos naturales de los que disponemos. Esto se debe a que el modelo energético actual está basado principalmente en recursos finitos, principalmente combustibles fósiles, y un constante crecimiento del consumo de energía. Las previsiones de la Agencia Internacional de la Energía (AIE) confirman esto e indican que la demanda de energía primaria mundial crecerá un 30% hasta el año 2040, manteniéndose un peso importante de los combustibles fósiles en la demanda total de recursos energéticos. La sustentabilidad de los recursos a largo plazo es una preocupación y por ello es necesario invertir recursos en la búsqueda de diferentes soluciones para estos problemas. Entre las soluciones planteadas destacan aquellas medidas destinadas a la mejora de la eficiencia energética. En la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible se fijaron objetivos para los estados miembro de las Naciones Unidas tales como desarrollar ciudades y asentamientos sostenibles, producción sostenible y promover la industrialización inclusiva y sostenible. Es por ello que el compromiso a nivel internacional para lograr la sostenibilidad y eficiencia ha tomado un importante papel desde ya hace algunos años.

El sector de la construcción no debe ser ajeno a este entorno y debe adaptarse lo antes posible. Mediante la inversión en I+D+i, se permitirá el desarrollo de nuevas técnicas, nuevos materiales o mejorar los ya existentes a fin de mantener los requisitos de habitabilidad y confort establecidos por las diferentes normativas estatales mejorando de este modo la eficiencia energética. Esto permitirá asegurar la sostenibilidad medioambiental del sector y el alineamiento con las políticas establecidas por las Naciones Unidas. En España este aspecto se ha puesto de manifiesto con la elaboración y posterior publicación del Programa Nacional de Reformas de 2017, mediante el cual se busca potenciar la eficiencia en edificaciones a fin de reducir los costes del sistema, sin perder competitividad.

Los datos de los últimos años muestran como el consumo en España de algunos sectores sigue aumentando, como se muestra en la Figura 1-1 para el sector de la construcción.

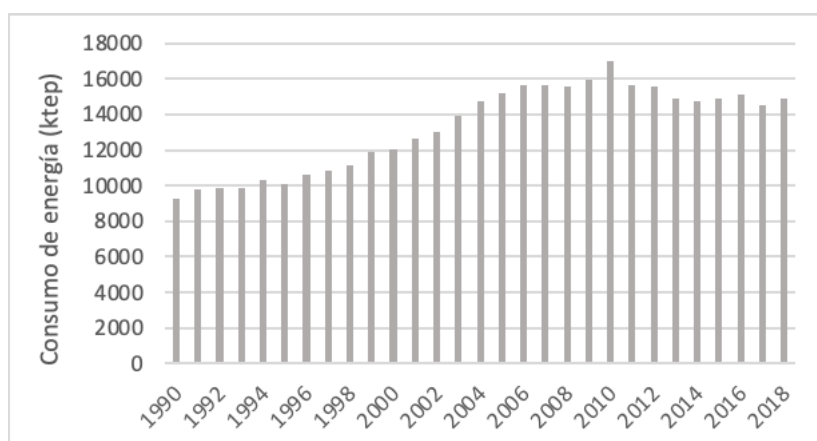


Figura 1-1 Consumo de energía en Ktep (tonelada equivalente de petróleo) en el sector de la residencial (datos obtenidos del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la energía (IDEA)).

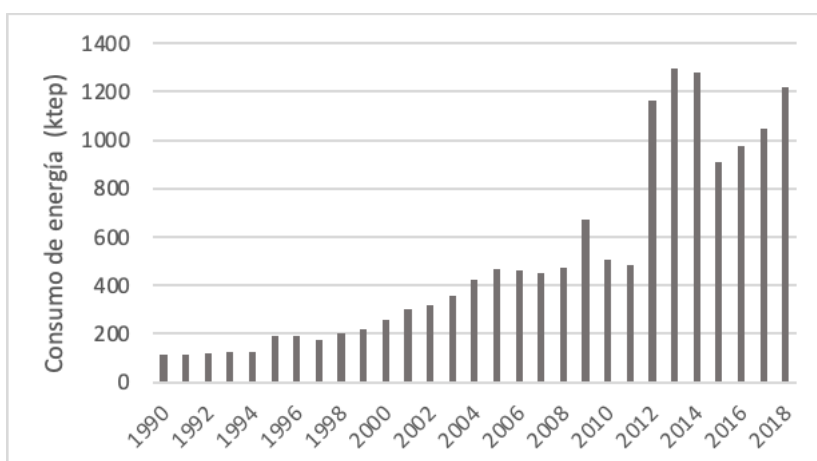


Figura 1-2 Consumo de energía en el sector de la construcción (Fuente: IDEA).

Con respecto al uso final de la energía consumida en el sector de la edificación, la calefacción supone el 47% del consumo de energía total de los hogares [1], siendo por tanto el principal foco sobre el que se puede actuar para incrementar el ahorro energético y la clave en la eficiencia energética.

El estudio de nuevas formas de construcción eficientes, tanto para edificios nuevos o de rehabilitación como para residenciales o para un uso de carácter terciario, que permitan reducir las emisiones de dióxido de carbono y gases contaminantes, aumentar la eficiencia y limitar la dependencia energética se hace indispensable para cumplir así con los objetivos marcados por España y la Unión Europea a corto y medio plazo en el Acuerdo de París [2]. Este acuerdo establece un marco global para limitar el calentamiento global incluyendo, entre otros objetivos, la reducción de las emisiones de efecto invernadero en al menos un 40% de aquí a 2030 con respecto a las de 1990 o la mejora de la eficiencia energética en al menos un 32.5% [3].

Actualmente, en las construcciones modernas la inercia térmica se mantiene mediante la instalación en las fachadas y cubiertas de sistemas de aislamiento térmico exterior (SATE), cuya eficacia en términos de ahorro energético puede llegar al 50% [4]. La eficiencia de aislamiento de estos sistemas depende de su espesor, lo que puede llevar a limitar su aplicación en determinadas construcciones antiguas, especialmente en aquellas anteriores a los años 50. En este tipo de construcciones el sistema SATE puede ser técnicamente inviable al no ser posible aumentar el espesor de las fachadas, ya sea por cuestiones urbanísticas o estéticas, sobre todo aquellas fachadas catalogadas como patrimonio histórico donde apenas se puede modificar a la estética del edificio. En general, en estas situaciones es necesario

emplear sistemas de mejora energética pasiva como por ejemplo la inclusión de materiales de cambio de fase (PCM) en la estructura interna de determinados materiales de construcción.

Los materiales de cambio de fase permiten absorber o ceder grandes cantidades de calor latente dependiendo de la temperatura a la cual se produce la transición de cambio de fase según su punto de fusión. Son capaces de almacenar grandes cantidades de energía a la temperatura de confort en forma de calor latente, siendo muy superior a la energía almacenada por materiales comunes en la edificación. Es por ello que la inercia térmica de estos materiales tiene un papel muy importante para lograr la estabilidad de la temperatura dentro de las edificaciones.

En la introducción de este trabajo se tiene como objetivo ahondar en el conocimiento existente sobre la incorporación de PCM en la estructura de los materiales de construcción, específicamente en la composición de morteros de cal. La literatura existente en el campo de la incorporación de PCM en materiales de construcción es profusa, especialmente en materiales tales como ladrillos, hormigón, yeso, así como de los paneles de aislamiento [5]. Sin embargo, hay menos estudios que analicen su incorporación a la estructura de los morteros de cal.

1.2 Contextualización

Desde la revolución industrial hasta hoy en día el ser humano ha ido aumentando la dependencia energética debido al actual modelo energético. Dicho modelo está basado en la energía obtenida a través de productos derivados del petróleo. Cada año se incrementa el consumo energético por parte de los países industrializados, así como el impacto que eso conlleva sobre la naturaleza. Esto es debido al incremento de los núcleos urbanos. El aumento de la población ha provocado la consolidación de grandes núcleos edificados, los cuales son productores de las grandes emisiones de gases a la atmósfera produciendo el conocido “efecto invernadero” [6].

El crecimiento demográfico y el consumo energético son dos variables altamente ligadas. Según las proyecciones de la Comisión Europea, durante un periodo comprendido entre los años 2000 y 2030 la demanda mundial de energía crecerá a un ritmo anual de 1.8% y el crecimiento demográfico se situará en torno al 1% [7]. Este nivel de progreso se apoya principalmente en el consumo de energía fósil (derivada de combustibles fósiles como el carbón, gas natural y petróleo). Su uso es precisamente uno de los factores que ha acelerado el cambio climático ya que son los principales causantes de las emisiones de CO₂.

El efecto invernadero es el responsable de cambios en el clima del planeta, produciendo un aumento de las temperaturas debido a la barrera que se forma en la atmósfera impidiendo que se expulse gran parte de la radiación solar. El principal gas de efecto invernadero es el CO₂, siendo la emisión de un 79% por parte de usos energéticos [8].

En este contexto, el sector residencial tiene un papel muy importante en la emisión de gases de efecto de invernadero a la atmósfera, principalmente dióxido de carbono. Se sitúa en el segundo lugar de toneladas de CO₂ emitidas a la atmósfera (como se muestra en la Figura 1-3), debido entre otras cosas a la climatización de los edificios a temperaturas constantes a lo largo del año para lograr temperaturas de confort. El sector de la construcción, aunque en menor medida es otro de los principales emisores de gases.

Emisiones de Gases de Efecto Invernadero por sectores en 2018 y en 2019

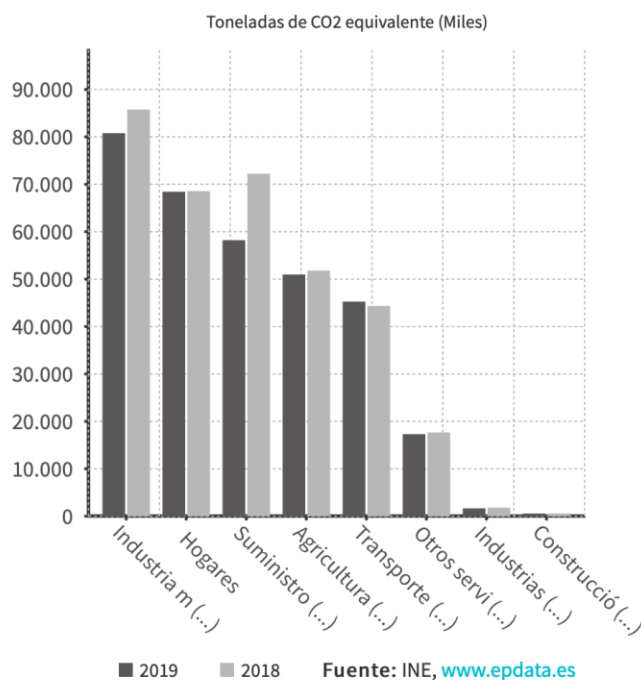


Figura 1-3 Comparativa de emisiones de CO2 en 2018-2019 [9]

Por ello, la sociedad se ha involucrado en una búsqueda de energías renovables, además de un uso eficiente de la energía. Como se muestra en la Figura 1-4, la evolución de emisiones de gases efecto invernadero en España lleva una tendencia descendente en los últimos años.

Evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero de España entre 2008 y 2019

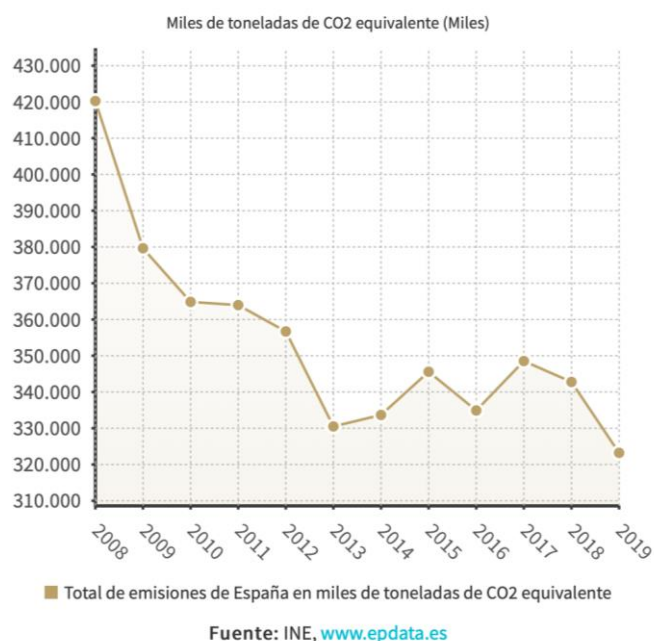


Figura 1-4 Evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero [9].

En el ámbito de la construcción se ha optado por los PCM, puesto que permiten la acumulación y liberación de energía durante el cambio de fase, teniendo un efecto positivo en la eficiencia energética. Una de las propiedades es la inercia térmica, que se refiere a la propiedad que tienen las paredes o el suelo de los edificios para acumular calor durante el día y liberarlo cuando es necesario debido a la bajada de temperaturas. De esta manera se consigue una estabilidad de la temperatura en el interior de las viviendas o grandes edificaciones conllevando un significativo ahorro energético y económico.

Actualmente, debido a que el uso de los materiales de cambio de fase se encuentra en fase de investigación, en muchos casos se opta por la construcción de muros de mayor espesor los cuales tienen una gran inercia térmica debido a sus características constructivas. Sin embargo, la construcción de muros de mayor espesor conlleva un alto coste económico asociado.

A continuación, se muestran las variaciones de temperatura que sufren las fachadas de los edificios durante dos épocas del año diferentes: verano e invierno. En la Figura 1-5 se puede observar cómo durante el invierno la variación de temperatura es menor, lo que significaría que el consumo energético será mayor para lograr una climatización de la temperatura en el interior. En cambio, durante el verano (Figura 1-6) debido a las grandes variaciones de temperatura entre el día y la noche se podría hacer un uso de los materiales de cambio de fase para la obtención de eficiencia energética, ahorro económico y menor impacto medioambiental.

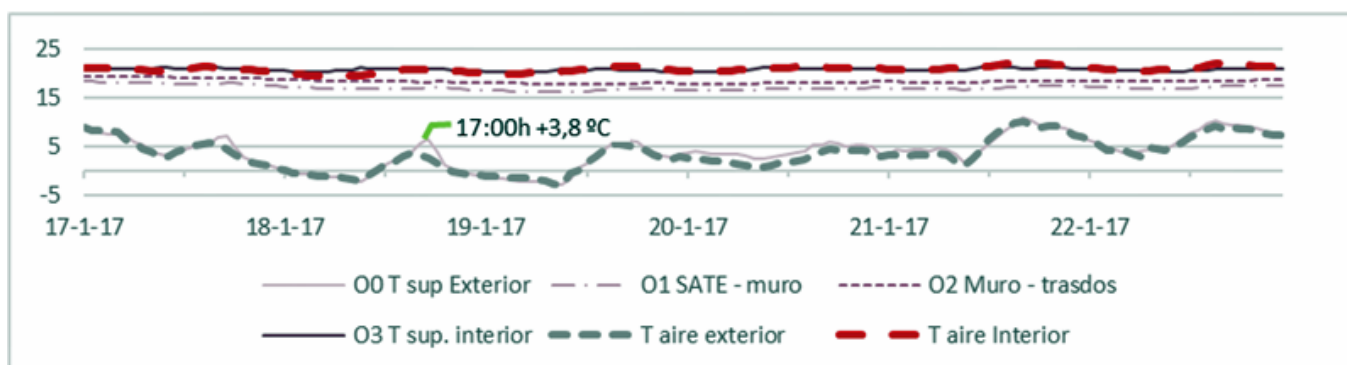


Figura 1-5 Variación temperatura en fachada en enero de 2017 [10].

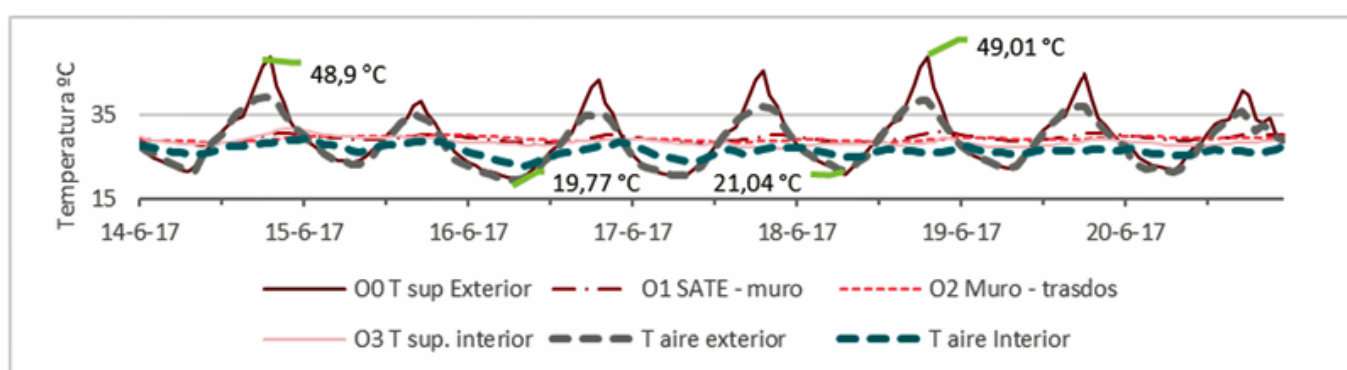


Figura 1-6 Variación de temperatura en fachada en junio de 2017 [10].

1.3 Objetivos

El presente trabajo se marca como objetivo principal llevar a cabo un análisis minucioso de cómo la incorporación de un determinado PCM puede influir en las propiedades físico-mecánicas de un mortero de cal. Todo ello con vistas a determinar si la incorporación de este compuesto puede ser o no adecuada para morteros de este tipo utilizados en el sector construcción.

Durante el desarrollo del trabajo se valorarán diferentes materiales de cambio de fase por sus propiedades tales como el punto de fusión, la densidad y la capacidad calorífica entre otros. Una vez seleccionado el PCM, el Rubitherm-RT 35 HC, siendo el más adecuado según sus características, se llevará a cabo tres muestras diferentes de mortero de cal con distintas dosificaciones de material de cambio de fase y un posterior estudio durante los siguientes veintiocho días.

Para alcanzar este objetivo principal se han marcado una serie de objetivos específicos o hitos a desarrollar. Los principales objetivos del trabajo serán:

- Estudio y selección del PCM más apropiado para mejorar las propiedades de los morteros de cal.
- Preparación de tres tipos de morteros de cal, uno sin PCM en su composición (denominado en este estudio como Referencia) y dos con distintas proporciones de PCM en su composición (5% y 10% en peso con respecto al aglutinante).
- Estudiar las propiedades físicas relacionadas principalmente con la estructura porosa del material.
- Estudiar las propiedades mecánicas, específicamente la resistencia a la compresión y dureza superficial con cumplimiento de la normativa vigente.
- Estudiar la capacidad de retención de calor mediante cámara termográfica.
- Análisis de los resultados obtenidos.

1.4 Orden de memoria

Tras la introducción de este trabajo y expuestos los objetivos del mismo, a continuación, se describirá la organización general que se llevará a cabo en la realización de este trabajo. El trabajo se estructura en seis capítulos principales y en anexos.

En el primer capítulo se realiza una breve explicación del trabajo, así como la motivación para la realización del mismo. Además, se remarcarán los objetivos específicos principales que se llevarán a cabo durante la fase experimental en el laboratorio. Para mostrar la razón del trabajo se realizará una breve contextualización del estado actual y cómo afecta en el día a día de la sociedad.

En el segundo capítulo se elabora un estudio del arte sobre los morteros, comenzando con una breve explicación y los principales tipos. En este capítulo se incluye un estudio de los principales materiales de cambio de fase haciendo un mayor énfasis en aquellos que serán usados a lo largo del trabajo.

En el tercer capítulo se detallarán los distintos procedimientos realizados durante el desarrollo del trabajo y los criterios de selección de los materiales. Además, se mostrará el material utilizado para la elaboración del trabajo y su funcionamiento.

En el cuarto capítulo se mostrarán los resultados obtenidos en laboratorio siendo analizados y discutidos en el quinto capítulo.

En el quinto capítulo se realizará una discusión sobre los datos obtenidos en el laboratorio, recogido en el cuarto capítulo, mencionando posibles líneas futuras de aplicación. Finalmente se hará una revisión de los objetivos alcanzados.

En el sexto capítulo se mencionarán las fuentes de información consultadas para la realización de dicho trabajo.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Almacenamiento de energía térmica

Los sistemas de almacenamiento de energía térmica (TES por sus siglas en inglés) son aquellos que permiten que densidades de energía elevadas sean almacenadas para variar según la demanda de energía. Estos sistemas se enmarcan dentro de las líneas de investigación de modelos energéticos sostenibles, ya que contribuyen a un uso energético eficiente.

El almacenamiento de energía térmica presente diferentes opciones:

- Almacenamiento en forma de calor latente, aprovechando el elevado valor de la entalpía del cambio de fase con materiales como el hielo, parafinas e hidratos de sal entre otros. Durante la transformación de la estructura molecular del PCM, la temperatura se mantiene constante. Esta forma de almacenar energía presenta una serie de ventajas respecto a los otros tipos que se detallarán a continuación. Las principales ventajas son que poseen una gran densidad de almacenamiento, selección de la temperatura a la que se va a trabajar y reducción de pérdidas energéticas causadas por variaciones de temperatura.
- Almacenamiento por medio de reacciones químicas, en las que se libera o absorbe energía durante los procesos de ruptura o unión de los enlaces moleculares, siendo una reacción reversible. La cantidad de calor almacenado depende del grado de conversión y del calor endotérmico de la reacción.
- Almacenamiento en forma de calor sensible, basado en la absorción o liberación de energía mediante el aumento o reducción de temperatura sin llegar a realizar un cambio de fase. La temperatura a la que es sometido el material es directamente proporcional al calor sensible. Las sustancias más utilizadas por las numerosas ventajas que tiene es el agua ya que tiene como características la no toxicidad de la sustancia, el bajo coste económico, gran disponibilidad y la elevada capacidad de almacenamiento y conductividad. Como desventajas presenta no ser eficiente por las elevadas pérdidas energéticas producidas por las variaciones de temperatura. Otro ejemplo de sustancia utilizada son las rocas.

Actualmente, la industria está investigando soluciones más baratas y más eficientes para ser empleadas como TES, donde destacan los PCM por su bajo coste y su alta capacidad energética como TES. La energía térmica que es necesaria para que un PCM cambie de fase es muy alta, por ello se busca el aprovechamiento como “almacén” de calor. Para aumentar la eficiencia energética y disminuir el coste económico los materiales de cambio de fase se basan en el almacenamiento de energía térmica. Este trabajo se centra en el TES con PCM.

El almacenamiento de energía térmica tiene como principal ventaja el aprovechamiento de la energía solar, calor proporcionado por la filtración de aire caliente, calor residual de equipos y procesos, así como de los ocupantes de la vivienda o edificio. Este recurso es utilizado tanto en sistemas de refrigeración como de calefacción. Todo ello conlleva un uso eficiente de la demanda energética [11].

2.2 Morteros

2.2.1 Definición y propiedades

Un mortero se define como *“cualquier mezcla natural o artificial cuyas características constructivas esenciales son su plasticidad inicial, que permite trabajarla y moldearla según la necesidad, que lo hace útil como material de construcción”* [12]

Los morteros destacan por sus propiedades y sus altas prestaciones, proporcionando seguridad, durabilidad y resistencia tanto a esfuerzo de compresión como al fuego. Sin embargo, cabe destacar su baja resistencia a la tracción. Están constituidos por una mezcla homogénea de origen sintético. Esta mezcla está compuesta por conglomerante (orgánico o inorgánico), árido fino (o en el caso del cemento mezcla de grueso y fino) y un disolvente (normalmente el más utilizado es el agua). También puede contener aditivos añadidos antes o durante el amasado, siendo la proporción no superior al 5% del peso del mortero y evitando que modifiquen las características químicas, mecánicas o físicas [13].

El conglomerante es *“el material capaz de unir fragmentos de una o varias sustancias y dar cohesión al conjunto por transformaciones químicas en su masa que originan nuevos compuestos”* [14]. Una de sus funciones principales es adherirse a la superficie del árido a las que debe unir rellenando los huecos que quedan entre las partículas del árido y la función de combinarse con el disolvente para conformar una estructura química consiguiendo la adherencia y resistencia del material.

Dentro de los conglomerantes orgánicos encontramos dos tipos, los termoplásticos (resinas celulósicas, polipropileno, poliacetato, polímeros acrílicos, etc.) y los termoestables (epoxi, poliamidas, vinilester, fenólicas, etc.).

Áridos

Los áridos son materiales inorgánicos empleados en la fabricación de morteros u hormigón. Están clasificados en áridos artificiales, de trituración o machaqueo y naturales. En este trabajo solo se trabajará con los naturales, que se clasifican según su tamaño en (Figura 2-1):

- **Arena o árido fino:** es el árido que pasa por un tamiz de 4 mm de luz de malla. Se encuentra recogido en la Norma Europea UNE -EN 933-2.
- **Grava o árido grueso:** se define como el árido que queda retenido en el tamiz de 4 mm de luz de malla. Se encuentra recogido en la Norma Europea anteriormente citada.
- **Árido total:** aquel que por sus proporciones de arena y grava es adecuado para el empleo en fabricación de hormigón.

Los áridos naturales también pueden ser clasificados en áridos granulares o áridos de machaqueo, siendo diferenciados en sus formas y superficies, así como su naturaleza.

Las principales características de los áridos son la forma de las partículas (coeficiente de forma e índice de lajas), humedad (absorción y entumecimiento), sustancias perjudiciales por las que está compuesto (equivalente de arena), resistencia mecánica, resistencia a las heladas y reactividad. Todas ellas están recogidas en normativa europea (UNE).



Figura 2-1 Tipos de áridos según granulometría [15].

Aditivos

Los aditivos son productos incorporados al mortero antes del amasado o durante el amasado de la mezcla del mortero. Su función principal es producir una modificación determinada de alguna de las características del mortero y con carácter permanente. Los aditivos están clasificados según las propiedades de la función principal que confieren al mortero. Los más comunes son: modificadores del contenido en aire, modificadores de la reología en estado fresco, modificadores del tiempo de fraguado y endurecimiento, resinas, hidrofugantes y retenedores de agua.

Estados de los morteros

Los morteros se pueden encontrar en dos estados fundamentales:

- **Estado fresco:** este estado responde a la fase del mortero una vez que la mezcla se ha realizado y amasado. La duración en este estado dependerá del tiempo de fraguado, siendo determinantes la temperatura, humedad y las proporciones utilizadas de la mezcla. Las principales características son:
 - Consistencia: manejabilidad del mortero. Depende de la cantidad de agua que vendrá determinada por la granulometría del mortero, aditivos usados y condiciones ambientales. Los materiales más utilizados para la mejora de esta propiedad son la cal, los plastificantes o aireantes. El método para hallar la consistencia es mediante una mesa de sacudidas, procedimiento de Norma UNE-EN 1015-3.

La consistencia está directamente relacionada con la proporción agua/cemento (A/C). Cabe destacar el fenómeno producido por el empleo excesivo de agua, o exudación, acumulándose en la parte superior del mortero y depositándose el árido más grueso en la parte inferior dando como resultado una mezcla no homogénea con una posible pérdida de las propiedades deseadas.
 - Tiempo de utilización: es el periodo en el cual el mortero tiene la manejabilidad suficiente para sin añadir más agua evitar el inicio de fraguado. Esta característica viene definida por el procedimiento de la Norma UNE-EN 1015-9 y corresponde con el número de minutos a partir del cual el mortero alcanza una resistencia determinada.
 - Densidad: relacionada con los componentes y su contenido en aire. La densidad del mortero fresco es determinada mediante Norma UNE-EN 1015-6.
 - Adherencia en estado fresco: capacidad del mortero para absorber las tensiones normales a la superficie de la base. En otras palabras, la resistencia del mortero a la

separación de su soporte. La adherencia depende directamente del conglomerante: cuanto mayor es la proporción de conglomerante o cantidad de finos arcillosos, mayor adherencia presenta el mortero. El exceso de conglomerante también puede ocasionar un deterioro de otras propiedades.

- Tiempo abierto: tiempo de espera admisible desde que es aplicada la mezcla hasta ser colocadas las piezas a adherir, sin afectar a la adhesión. La medición de esta propiedad viene recogida por la Norma UNE-EN-1346.
- Contenido de iones de cloruro: los iones de cloruro son solubles en el agua durante el proceso de amasado de la mezcla en estado fresco. Esto puede dar lugar a un proceso de corrosión en el caso de existir armaduras. Por ello, es necesario el control en mortero armados conforme a la Norma UNE-EN 1015-17.
- Capacidad de retención de agua: esta propiedad está relacionada con el tipo de árido utilizado (granulometría), el conglomerante y en general, con la viscosidad de la pasta tras el amasado. El mortero conserva el agua para hidratar la superficie de las partículas del conglomerante y del árido. Por consecuencia, afectará al grado en que ha sido hidratado el conglomerante, variando el tiempo de endurecimiento del mortero. Esta propiedad se recoge en la Norma UNE-EN 134.
- **Estado endurecido**: superado el estado fresco, el mortero endurecerá hasta consolidarse. Finalizado el tiempo de fraguado el material adquiere las propiedades mecánicas de resistencia. En esta fase debe ser considerado su estado límite de agotamiento, así como los factores ambientales a los que estará expuesto el material y que limitarán su vida útil, definiéndose así la durabilidad del mortero como la resistencia al ataque de agentes externos. Posteriormente, se realiza un estudio de las propiedades del mortero una vez transcurrido el tiempo de fraguado.
 - Resistencia mecánica: o capacidad de soportar y transmitir las cargas a las que puede ser sometido el mortero. La resistencia viene determinada por la Norma Europea UNE-EN 998-2, que establece las designaciones características en función unas resistencias tipificadas.
 - Adherencia: o resistencia a la tracción de la unión entre el mortero y el soporte donde se ha producido el endurecimiento. Para determinar la adherencia se realiza un ensayo en el que se debe extraer del molde o soporte de forma perpendicular a la superficie del mortero. Según la aplicación del mortero, la adherencia se determina basándose en diferentes normas: en el caso de los morteros de albañilería por la UNE-EN 1015-12 y para morteros de cola norma UNE-EN 1348.

Existen principalmente dos tipos de adherencia: la química que está basada en enlaces químicos localizados en la superficie de contacto entre el mortero y el soporte y física, basada en la cohesión de dos piezas sólidas.

Cabe destacar que la permeabilidad del soporte afectará a la adhesión entre dos piezas o a la hidratación del cemento, según la capacidad de absorción del soporte utilizado.
 - Retracción: contracción producida por la disminución del volumen del mortero durante el tiempo de fraguado y en el inicio del endurecimiento del mortero. La cantidad de agua añadida durante el amasado afecta a esta característica, ya que cuanto mayor sea la cantidad de agua en el amasado, mayor retracción tendrá el mortero.

- Absorción de agua: esta propiedad afecta principalmente a aquellos morteros expuestos a la lluvia. Por lo general esta propiedad no es deseada en los morteros ya que provoca filtraciones y humedades en el interior del mortero. Es por ello que depende de la estructura capilar del material. Cuanto mayor sea la red capilar, menos compacto será el mortero y provocará una mayor absorción de agua. Mediante aditivos como los plastificantes, aireantes o hidrofugantes se puede disminuir la absorción de agua. La absorción de agua para los morteros sometidos a agente externos como la lluvia es determinada por la norma UNE-EN 1015-18.
- Densidad: depende principalmente de los conglomerantes, aditivos y áridos empleados en el mortero y está directamente relacionada con la proporción agua/cemento (A/C) del mortero. Otros de los factores que afectará a la densidad es la granulometría y volumen ocupados en la dosificación. Para determinar la densidad hay que seguir el procedimiento que figura en la norma UNE-EN 1015-10.

2.2.2 Tipos de morteros

Existen varios tipos de morteros en función de las materias primas empleadas en su elaboración. Según el conglomerante que lo compone, se pueden distinguir varios tipos, entre los que destacan el mortero de cal (elaborado a base de cal, arena y agua) y el mortero de yeso (elaborado a base de yeso, arena y agua).

Este trabajo está basado en el estudio de las propiedades del mortero de cal, ya que recientemente se está extendiendo de nuevo su uso, especialmente en construcciones antiguas, debido a su mayor compatibilidad tanto física como química. Además, esto se debe a que el mortero de yeso a pesar de tener una gran velocidad de fraguado y capacidad de absorción, no tiene la resistencia suficiente para el sector de la construcción actual y el cemento Portland presenta una afinidad química y física con los materiales de construcción, además de que induce formas de alteración ocasionadas por el aporte de sales solubles [16] [17].

En algunas épocas, el mortero de cal ha dejado de tener tanto protagonismo debido al peligro que supone apagar la cal a pie de obra por las reacciones exotérmicas que se producen. El tiempo de cocción es otro factor determinante siendo casi tres veces mayor el de la cal respecto al del yeso, lo que supone un consumo energético mayor. En la construcción actual se ha conseguido reducir los consumos energéticos de los morteros de cal a través de nuevas prácticas constructivas [18] [19].

En general, el mortero de cal es un mortero de gran plasticidad, fácil de aplicar, flexible y untuoso, mientras que el mortero de yeso es menos resistente, pero tiene la capacidad de endurecer rápidamente. El mortero de cal presenta otra serie de ventajas frente al mortero de yeso como los resultados que se obtienen a nivel estético, los resultados obtenidos de sus numerosas aplicaciones a lo largo de la historia, su elasticidad (evitando retracciones), su usabilidad en procesos de revestimiento que no precisan de acabados posteriores y son aplicables a revestimientos exteriores por su impermeabilidad. La Tabla 2-1 recoge las principales ventajas y desventajas del mortero de cal y yeso. En función de la aplicación a la que esté destinada el mortero se deberá elegir el que disponga de las propiedades físicas que más interesen.

	Ventajas	Desventajas
Mortero de cal	-Lenta carbonatación de la cal, progresivo endurecimiento. -Cal grasa aportar plasticidad. -Coloreado en masa o superficie -Resistencia -Impermeabilidad	-No excesiva adherencia -No alto contenido en humedad -Elevado coeficiente de retracción -Desciende los colores
Mortero de yeso	-Coeficiente de retracción igual a cero -Coloreado en masa y superficie.	-No uso bajo alto contenido en humedad. -Ataca al acero y al hierro en presencia de humedad. -No excesiva adherencia -Aumenta los colores -No impermeable

Tabla 2-1 Ventajas y desventajas principales entre mortero de cal y yeso [20].

Por todo lo anteriormente expuesto, el estudio que se realizará a lo largo de todo este trabajo de fin de grado será sobre el mortero de cal.

Centrándose este trabajo en los morteros de cal, su denominación viene determinada por su composición y la proporción de los componentes o según alguna característica específica que defina su resistencia. La normativa viene recogida en la norma UNE EN 998-2.

La resistencia a compresión de los morteros viene establecida por los valores que aparecen en la:

Mortero tipo	Resistencia kg/cm ²
M-20 (M-2)	20
M-40 (M-4)	40
M-80 (M-8)	80
M-160 (M-16)	160

Tabla 2-2 Resistencia mínima de los morteros tipo.

Las dosificaciones de los morteros vienen recogidas en la norma NBE FL-90. En la Tabla 2-3 se resumen los principales morteros tipo para obtener resistencias mínimas a compresión a partir de las dosificaciones:

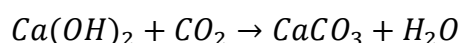
Mortero NBE FL-90	Tipo	Cemento	Cal aérea	Cal hidráulica	Arena
M-2	a	1	-	-	8
	b	1	2	-	10
	c	-	-	1	3
M-4	a	1	-	-	6
	b	1	1	-	7
M-8	a	1	-	-	4
	b	1	1/2	-	4
M-16	a	1	-	-	3
	b	1	1/4	-	3

Tabla 2-3 Dosificaciones según norma NBE FL-90.

El primer valor que aparece en la columna expresa la resistencia mínima que debe soportar a compresión el mortero en N/mm².

Para la composición de los morteros es necesario aclarar si las proporciones tomadas son respecto al volumen o peso, indicando también la cantidad de agua utilizada durante el amasado. En función de la composición el mortero tiene que cumplir una resistencia mínima a compresión, la cual viene recogida en la norma UNE-EN 998-2:2018 [21].

Antes de profundizar en los tipos de morteros, es necesario describir uno de los procesos químicos más relevantes para los morteros de cal, la reacción de carbonatación. La carbonatación es un proceso natural en el que el dióxido de carbono de la atmósfera penetra hacia el interior del material a través de los poros que se encuentran en la superficie exterior. Cuando se encuentra en el interior, el dióxido de carbono reacciona con el hidróxido de cálcico de la mezcla formando carbonato cálcico insoluble. En función del grado de cristalinidad el carbonato formado puede presentar tres modificaciones cristalinas polimórficas anhidras distintas, la más estable es la calcita (esta se ve favorecida cuando hay un exceso de ion Ca⁺² en el medio) pero también pueden formarse fases metaestables como la vaterita (su formación se ve favorecida en medios donde la concentración de iones CO₂ supera con creces a la de iones Ca⁺²) y el aragonito (su formación se ve favorecida a altas temperaturas y presiones [22] [23] [24]). La fase en que cristaliza el carbonato de calcio influirá en el comportamiento del mortero.



En cualquier caso, para que se produzca la reacción es necesaria la presencia de humedad, siendo la situación más favorable cuando esta está comprendida entre el 50-70%. Cuando el grado de humedad es elevado, el CO₂ tiene dificultades de difundir a través de los poros, lo que dificulta la reacción de carbonatación. La reacción de carbonatación tiene un efecto directo sobre la mejora de las propiedades mecánicas del mortero, produciéndose un incremento a medida que aumenta el grado de carbonatación [25].

La forma para comprobar el grado de carbonatación es el pH, utilizado para analizar la alcalinidad (capacidad para neutralizar ácidos). Por ello, cuanto mayor pH, mayor será la alcalinidad y menor capacidad para neutralizar ácidos [26].

Dentro de los morteros de cal se profundizará a continuación en los dos más utilizados:

- Mortero de cal aérea: la obtención se realiza a través del proceso de calcinación del carbonato cálcico, que se encuentra en la naturaleza en forma de piedras calizas. Estas piedras calizas son calcinadas a temperaturas superiores a los 900°C obtenido como resultado de la reacción el óxido de cal (CaO) y la emisión de dióxido de carbono a la atmósfera. El producto sólido de óxido de calcio se denomina cal viva. Posteriormente se añade agua al óxido de cal para apagar la cal viva, obteniendo hidróxido de cal, más conocida como cal apagada o cal hidratada. Como consecuencia de esta reacción hay un desprendimiento de calor y un aumento de volumen. Este proceso es conocido como apagado y en función de la cantidad de agua que se ha añadido obtenemos la cal en forma de polvo o de pasta. Finalmente, con la adición de la arena y agua obtenemos el mortero de cal aérea que es denominado así por la necesidad de desprenderse del agua y capturar dióxido de carbono de la atmósfera para el secado y posterior endurecimiento. El proceso de obtención de cal aérea viene detallado en la Figura 2-2.

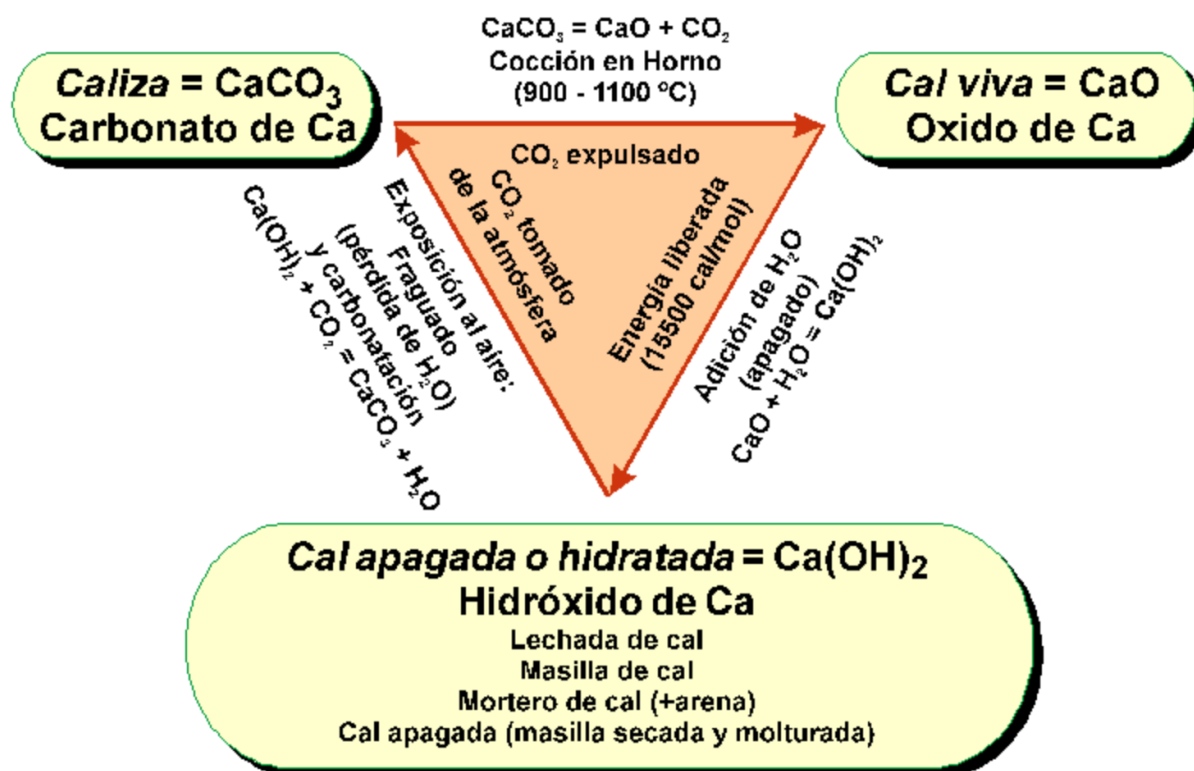


Figura 2-2 Ciclo de obtención de cal aérea [12].

- Mortero de cal hidráulica: a partir de la obtención de carbonato cálcico se añaden arcillas, las cuales contienen en mayor proporción sílice y alúmina y en menor medida óxido de hierro. En el proceso de obtención de cal hidráulica, la temperatura alcanzada durante la cocción en el horno llega hasta los 1200°C, produciéndose reacciones de deshidratación y carbonatación durante el incremento de temperatura. En este proceso, al igual que en el caso de los morteros de cal aérea, se forma también cal viva que tiene que ser apagada para la obtención de cal aérea apagada. Como resultado, la cal hidráulica obtenemos compuestos de cal aérea, que tendrá su respectivo tiempo de fraguado, y el compuesto de cal hidráulica, con su correspondiente tiempo de fraguado. Para la obtención del mortero de cal hidráulica se debe añadir agua para realizar el amasado provocando la hidratación de los compuestos hidráulicos mientras que el hidróxido de calcio debe evaporar el agua que contenga y

capturar el dióxido de carbono. En resumen, durante este proceso es necesario aire además de una inmersión parcial en agua para el conglomerante hidráulico.

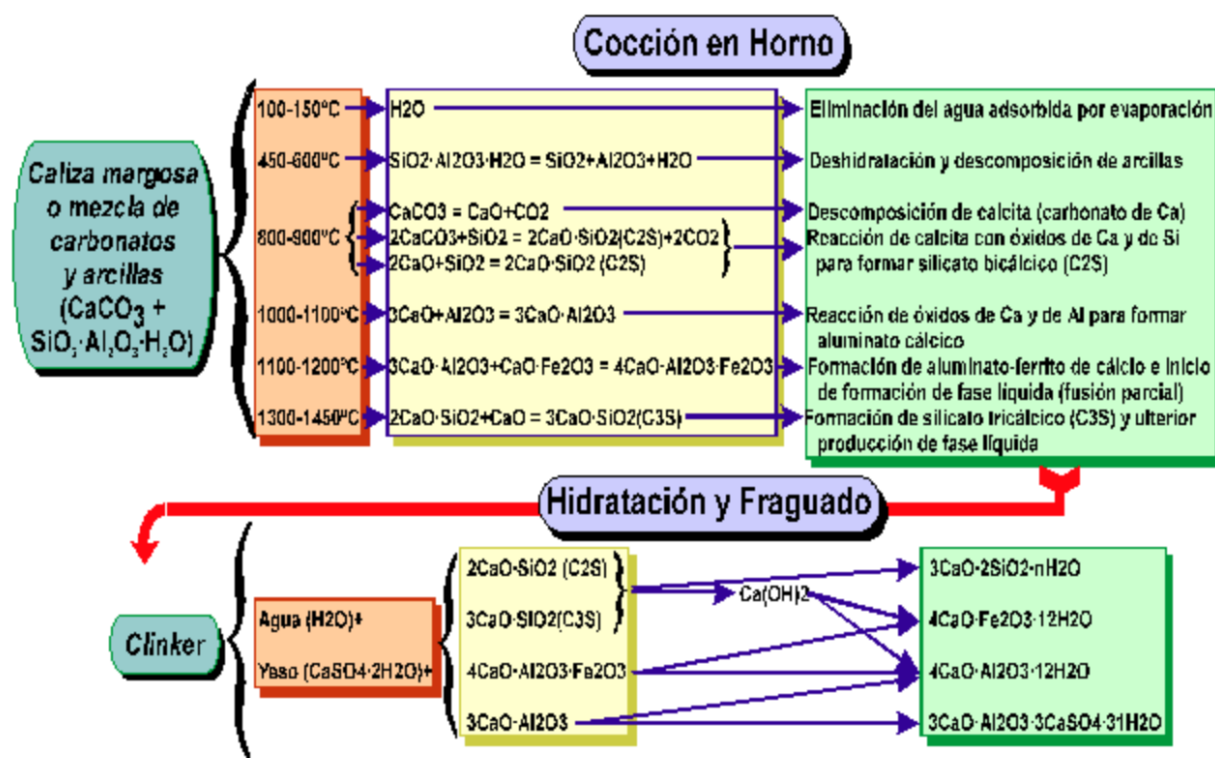


Figura 2-3 Ciclo de cal hidráulica [12].

2.3 Materiales de cambio de fase (PCM)

2.3.1 Definición

Los materiales de cambio de fase son elementos cuya principal característica es el cambio de fase. Para usos relacionados con la edificación, el cambio de fase de sólido a líquido viceversa es el más común puesto que, aunque la cantidad de energía almacenada es inferior que en otros cambios de estado (sólido a gas o viceversa), tiene una menor variación de volumen. El calor latente o energía necesaria para el cambio de fase de un material, debe estar comprendido entre 100 y 250 KJ/Kg. Algunos ejemplos de PCM son las ceras de parafina, sales hidratadas, mezclas eutécticas y ácidos grasos explicando algunos de ellas posteriormente [27].

Una de sus principales características de los PCM es su mayor capacidad de almacenamiento de calor en espesores menores que los materiales convencionales como la madera u hormigón [28]. Los PCM han sido considerados fuentes de almacenamiento de energía térmica desde 1980. Existen dos tipos de PCM utilizados para calentamiento y enfriamiento de los edificios: los utilizados en paredes o componentes de la edificación (pasivos) y los utilizados en unidades de almacenamiento de frío y calor (activo). Su aplicación en la construcción para incrementar la eficiencia energética se debe a que estos materiales absorben o ceden calor cuando se alcanza la temperatura de cambio de fase, es decir el punto de fusión o solidificación, cuando pasan de estado sólido a líquido o viceversa. Durante el cambio de fase la temperatura del material se mantiene constante y el material continúa absorbiendo energía.

Además, las principales características que debe tener los materiales de cambio de fase empleados en la construcción deben ser [27].

- Alta estabilidad a los ciclos de cambio de fase debido a que el objetivo de la edificación es de una larga vida útil.
- No deben ser corrosivos ya que podrían producir fugas o provocar daños en la estructura del edificio.
- Alta conductividad térmica para ceder o absorber energía.

2.3.2 Clasificación de PCM

El uso de PCM comenzó durante el primer tercio del siglo XX, donde según las necesidades y aplicaciones fueron diseñándose numerosos productos PCM con diferentes propiedades físicas, químicas y térmicas. Es por ello que existen diferentes clasificaciones atendiendo a distintos criterios que han sido desarrolladas desde finales del siglo XX hasta hoy en día.

En primer lugar, Abhat clasificó en 1983 los materiales de cambio de fase utilizados para almacenamiento de energía térmica [29].

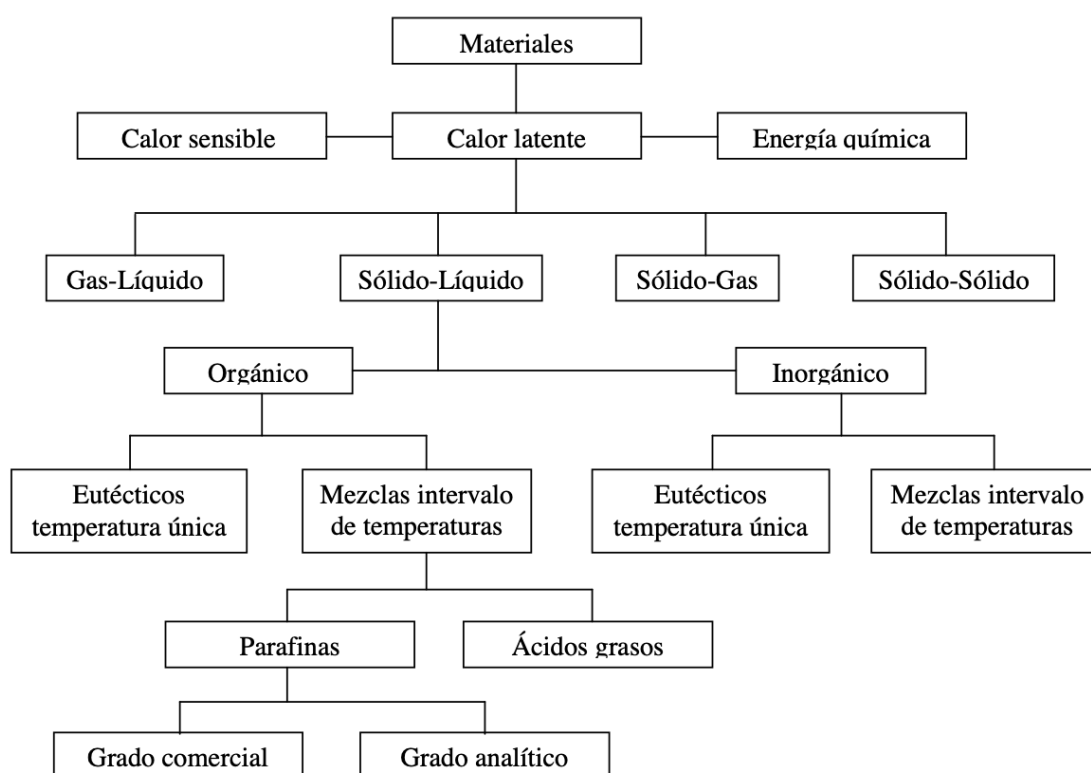


Figura 2-4 Clasificación de los materiales de cambio de fase según Abhat [29]

Como se puede apreciar en la Figura 2-4 y como se mencionó anteriormente, entre los posibles cambios de fase, el más estudiado y más interesante por sus aplicaciones es el cambio de fase de estado sólido a líquido. Esto se debe a su menor variación de volumen a pesar de que su capacidad de almacenamiento de energía es menor a la de otros.

Posteriormente, Sharma y Sagara presentaron otra clasificación detallada de los materiales de cambio de fase centrándose en la transformación de fase sólido-líquido, donde se agrupan en cuatro familias: orgánicos, inorgánicos, eutécticos y mezclas [30].

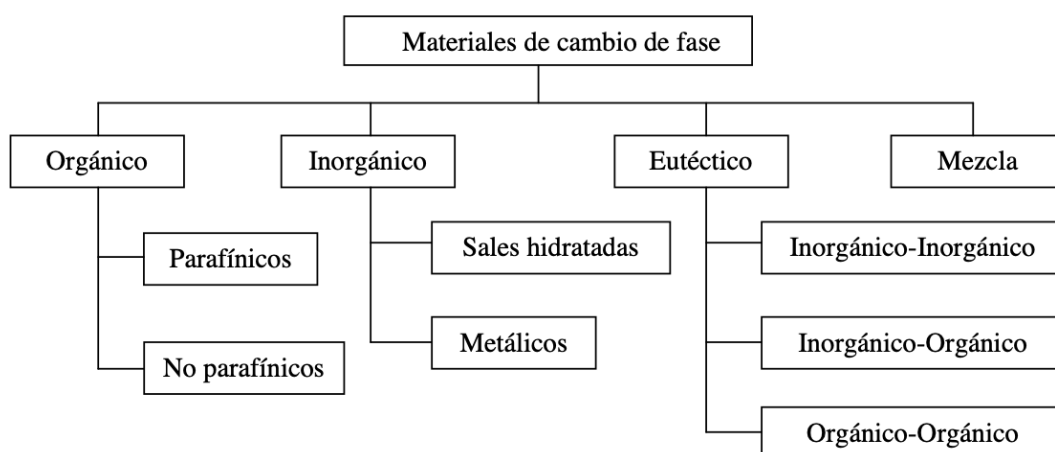


Figura 2-5 Clasificación de los materiales de cambio de fase sólido-líquido [30].

Los PCM orgánicos se clasifican en parafínicos y no parafínicos.

- Los **materiales parafínicos** son un alcalino sólido refinado. Es una mezcla química de alcanos en cadena lineal del tipo $\text{CH}_3\text{-(CH}_2\text{)-CH}_3$, donde se libera una gran cantidad de calor latente en su cadena $\text{CH}_3\text{-}$. Cuanto mayor es la cadena, más aumenta el punto de fusión y el calor latente. Químicamente son inertes, no reaccionan con la mayoría de químicos comunes. Tienen una alta nucleación y tasa de cristalización sin subenfriamiento.
- Los **materiales no parafínicos** son aquellos materiales parafínicos que no son del grupo de parafinas, los más numerosos de los PCM y con propiedades muy variadas. Cada uno de ellos tiene unas propiedades particulares.

Los materiales no parafínicos más estudiados son los ácidos grasos, siendo derivados de productos animales y vegetales. Su larga cadena está constituida por más de doce carbonos. Su fórmula $\text{CH}_3\text{-(CH}_2\text{)}_n\text{-COOH}$, cuyo extremo termina en -COOH . La temperatura de fusión también aumenta con la longitud de la cadena. No son compatibles con metales por su carácter ácido.

Por su parte, los PCM inorgánicos se clasifican en sales hidratadas y metálicos.

- Las **sales hidratadas** son aleaciones de sales inorgánicas y agua que forman un sólido cristalino. Durante la deshidratación e hidratación de la sal se produce la transformación de estado sólido a líquido y viceversa. Estos materiales tienen una alta capacidad de almacenamiento de calor. Poseen compatibilidad con contenedores plásticos y sufren poca variación en la transición de fase.
- Los **metálicos** están formados por materiales con bajo punto de fusión. Actualmente es uno de los materiales menos utilizado como material de cambio de fase, ya que tiene un gran número de desventajas como su alto peso. Por lo contrario, cuenta con buenas características debido a su alta conductividad térmica.

La Tabla 2-4 recoge las principales ventajas y desventajas de los CPM orgánicos e inorgánicos:

Orgánicos	Inorgánicos
Ventajas	
Bajo o inexistente subenfriamiento	Superior entalpía
No corrosivo	Mayor densidad
Estabilidad termo-química	Alta conductividad térmica
Desventajas	
Baja conductividad térmica	Corrosivo
Inflamable	Segregación en fases
Menor entalpía de cambio de fase	No estabilidad térmica
Menor densidad	

Tabla 2-4. Comparativa PCM orgánicos e inorgánicos [11]

Para la representación de los datos térmicos más representativos tales como la entalpía y temperatura de fusión, Alicia Oliver [31] mostró la relación entre la temperatura y el calor de fusión de los PCM.

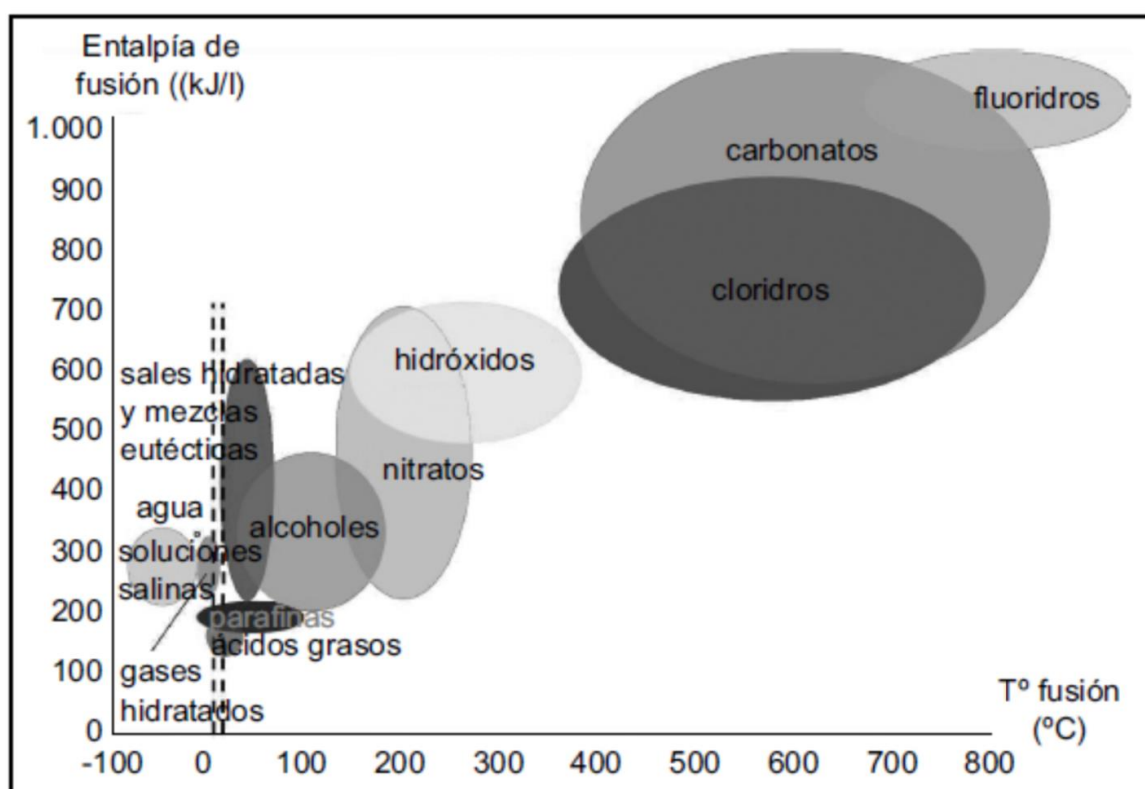


Figura 2-6 Relación del punto de fusión y entalpía para selección de PCM según su aplicación [31].

2.3.3 Métodos de incorporación de PCM

La integración de los PCM en las envueltas de los edificios requiere un medio adecuado el cual garantice una estabilidad y encapsulación frente a fugas. Para ello, existen diferentes métodos para la incorporación de las sustancias de cambio de fase:

Directa

Este método es el más utilizado actualmente. Consiste en la incorporación de PCM en estado líquido o sólido (polvo) a los materiales de construcción, como pueden ser el hormigón o el yeso, durante su elaboración. Se trata del medio del método más económico. La resistencia que llegan a obtener los materiales varía en función de las composiciones.

Encapsulado

Este método es utilizado para evitar el contacto directo de los materiales de construcción con los de cambio de fase. Existen dos formas de encapsulado de PCM: microencapsulado y macroencapsulado.

Microencapsulado: es el procedimiento en el que se rodea o envuelve una sustancia en otra de menor tamaño, produciendo cápsulas cuyos tamaños oscilan desde diámetros de 1 μm hasta 100 μm . Las formas más comunes del microencapsulado son las esféricas, formando la pared una superficie continua que rodea el núcleo. Generalmente son simétricas, pero pueden producirse formas asimétricas y variables. El núcleo está formado por una pequeña cantidad de gotas incorporadas a lo largo de la microcápsula. La materia del núcleo puede encontrarse en estado líquido, sólido y gaseoso, siendo más manipulable en estado líquido y gaseoso.

El material del núcleo puede ser encapsulado para ser liberado poco a poco a través de las paredes de la cápsula siendo denominado liberación controlada o difusión. La otra forma es mediante condiciones externas las paredes de la cápsula se rompan, disuelvan o fundan.

El proceso de incorporación de un PCM en microencapsulado se representa en la Figura 2-7.

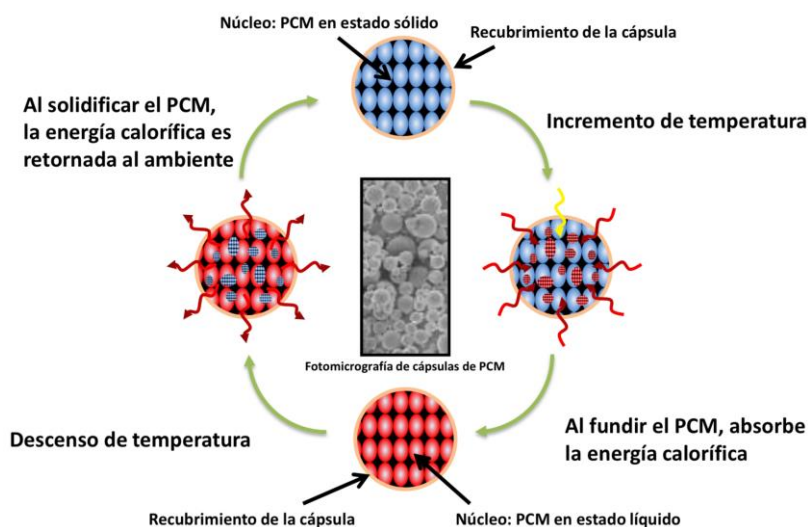


Figura 2-7 Funcionamiento de PCM en microencapsulado [32].

El material que es utilizado para recubrir la cápsula se denomina revestimiento, membrana o material de la pared. Las principales características que tienen son [32]:

- Diferentes colores.
- Rango de temperaturas regulables según demanda.
- Tamaño medio de las partículas es de micras.
- Estabilidad a elevadas temperaturas.
- Tiene forma de polvo o pasta de filtración húmeda.



Figura 2-8 Proceso de cambio de fase en cápsulas con PCM [33].

Macroencapsulado: se trata de cápsulas esféricas de mayor tamaño (mm), tubos u otros recipientes formados por altas concentraciones de PCM que se incorporan a los materiales de construcción. Tienen su origen en el sector textil ya que son utilizados para regular la temperatura corporal. Absorbe el exceso de calor y permite regular la temperatura. Las principales características del macroencapsulado [32] son:

- Diferentes colores.
- Regulación de temperaturas según demanda y condiciones.
- Forma esférica.

Inmersión

Utilizado en materiales de construcción porosos (ladrillos o bloques de hormigón). Se dispondrá el PCM fundido en caliente para sumergir en él los materiales de construcción, absorbiendo y rellenando los poros por capilaridad con el material de cambio de fase. Tras ser sumergido y rellanados los poros, se deja enfriar. De esta manera se consigue que los poros sean rellenos por PCM. Entre los principales factores de los que depende este proceso están [34]:

- La temperatura de fusión del material.
- La viscosidad.
- El tamaño de los poros.
- Superficie de contacto de los poros con el PCM

2.3.4 Aplicaciones de los PCM

Las aplicaciones de los PCM son muy numerosas hoy en día. Son utilizados en diferentes sectores, tales como la agricultura, textil, en productos farmacéuticos, pinturas para recubrimiento, impresión y en muchos otros sectores. A continuación, se explicará de forma breve la aplicación en los principales sectores:

- **Sector de la construcción:** ha sido incorporado con la finalidad de mejorar las propiedades para una mayor eficiencia energética, ahorro económico y sostenibilidad medioambiental. Son utilizados para el aprovechamiento de la energía solar y el calor radiado, para la eficiencia en la calefacción y la refrigeración de las edificaciones. Pueden ser aplicados en los materiales de construcción de los edificios o en materiales de decoración como pueden ser tejas, azulejos, baldosas, techos, etc. Durante el día el PCM estaría sometido al proceso

de fundición absorbiendo calor de la habitación o edificio y de este modo se mantendría la temperatura confort. En cambio, durante la noche el PCM el proceso que se sucede es el de solidificación, liberando calor que había sido almacenado cuando disminuye la temperatura [35].

Otra de las aplicaciones estudiadas es el uso de PCM para la ventilación o sistemas de aire acondicionado mediante el almacenamiento de frío durante los periodos en los que las tarifas de electricidad son más baratas y evitando el uso de energía eléctrica durante los picos de mayor demanda del día donde las tarifas son más elevadas [36].

También existen numerosos estudios en los que plantea si la incorporación de PCM, como puede ser la parafina, se puede aplicar a colectores solares térmicas con el objeto de reducir el consumo de energía convencionales en sistemas de suelo radiante [37].

- **Sector del transporte y almacenamiento:** los PCM son utilizados en el transporte como alternativa al transporte refrigerado o el hielo seco llevando consigo un gran ahorro económico. También se pueden incorporar a contenedores de productos farmacéuticos o alimentos perecederos por ser productos sensibles a la temperatura. Actualmente, se están aplicando en equipos de mantenimiento de cadena de frío farmacéuticos y de vacunas, como por ejemplo el almacenamiento de la vacuna del COVID-19 necesita transporte refrigerado. Kristen Parraish, profesor e ingeniero medioambiental de la Universidad de Arizona, se ha centrado en el uso de PCM como tecnología de enfriamiento en refrigeradores industriales [38].
- **Sector electrónico e informático:** su principal aplicación en este sector es la refrigeración de componentes eléctricos, siendo una de las mejoras de mantenimiento preventivo para los elementos de los ordenadores o productos tecnológicos [39].
- **Sector del automóvil:** actualmente se encuentra en investigación la aplicación de PCM en los sistemas de refrigeración de los coches. El objetivo es la reducción de volumen y mejora de prestaciones. Además, existen estudios sobre la aplicación de dichos materiales para mantener la temperatura confort dentro del vehículo [40].
- **Sector alimentario:** los aromas de los alimentos son volátiles por lo que en la actualidad se utiliza el encapsulamiento para el mantenimiento y extensión de vida útil. Con ello se retiene el sabor de los alimentos. Otro uso actual de los PCM es para proteger de la oxidación u otras reacciones que pueden estar causadas por la exposición temporal del alimento a la luz [41].

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Materiales y métodos

3.1.1 Materiales empleados

Los morteros de cal analizados en este estudio están compuestos por arena de granulometría 1,48mm, cal hidratada en polvo blanco y agua. Además, como aditivos se ha utilizado un material de cambio de fase (PCM), Rubitherm-RT 35 HC, mediante adicción por método directo en estado sólido (polvo).

Para los ensayos se prepararon tres mezclas de mortero de cal diferentes: de referencia (sin adicción de PCM), con un contenido del 5% de PCM y tercera con un contenido del 10% PCM, ambos porcentajes referidos en peso con respecto al aglutinante. Además, para los diferentes ensayos se necesitaron diferentes geometrías de las probetas por lo que se realizaron probetas cúbicas (4,7x4,7cm), cilíndricas pequeñas ($\varnothing$ 3,8x1,9cm), cilíndricas grandes ($\varnothing$ 5,3x13cm) y cónicas ($\varnothing$ 4,5x $\varnothing$ 6,3x9,1cm) (ver Figura 3-1).

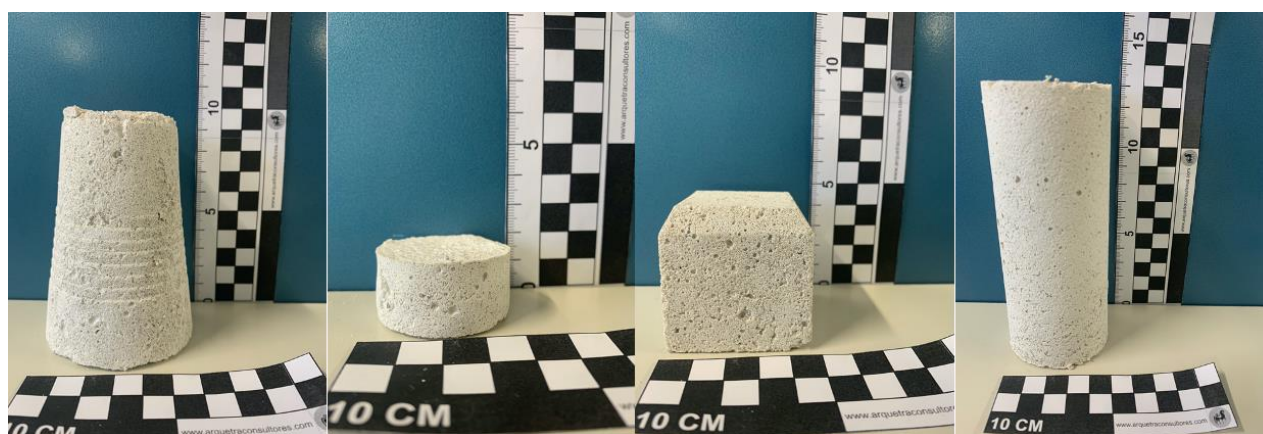


Figura 3-1 Fotografía de las diferentes geometrías de probetas utilizadas sobre escala real en cm.

Proporciones empleadas en las mezclas

Las dosificaciones realizadas en este trabajo de fin de grado para los morteros de cal son expresadas en relación 1:3, siendo 1 referido a la proporción de cal hidratada en polvo blanco utilizada y 3, la proporción de árido fino (arena) utilizada. En la Tabla 3-1 podemos observar las cantidades de materiales empleados en este trabajo.

Muestra	Cal (kg)	Arena (kg)	PCM (g)
Referencia	1,8375	12,790	-
5%	2,9460	16,00	283,5
10%	1,5560	12,007	240,0

Tabla 3-1 Dosificación mortero de cal basada en la relación 1:3.

Contenido del agua mediante método gravimétrico

El contenido de agua añadida a cada mezcla de mortero se determinó mediante el método gravimétrico. Este método se emplea habitualmente para hallar el contenido de agua o humedad en un material. Consiste en coger una muestra del mortero preparado, pesarla antes (M_o) e introducirla en la estufa para su secado a una temperatura de 75° C hasta alcanzar masa, pesando esta última muestra (M_f).

$$Water\ content = 100 \times \frac{(M_o - M_f)}{M_f}$$

siendo, M_f es la masa final tras secado en estufa y M_o es la masa inicial previa al secado en la estufa.

Atendiendo a los resultados obtenidos, se observa que el contenido de agua fue ligeramente distinto entre las muestras de referencia y las de mortero de un 10% de PCM. Sin embargo, en las muestras de 5% de PCM el porcentaje de agua fue un 4% mayor respecto al de referencia y a la muestra con un 10% de PCM.

Muestras	Mo (g)	Mf (g)	%
Muestra 1 (5% PCM)	34,85	28,24	22,62
Muestra 2 (5% PCM)	44,96	36,63	22,74
Muestra 3 (Referencia)	37,15	31,43	18,20
Muestra 4 (Referencia)	31,50	26,86	17,27
Muestra 5 (10% PCM)	40,62	34,28	18,49
Muestra 6 (10% PCM)	32,67	27,52	18,71

Tabla 3-2 Resultados del estudio gravimétrico para hallar el contenido de agua.

3.1.2 Selección de materiales de cambio de fase

Al inicio del trabajo se disponía de tres materiales de cambio de fase: Rubitherm-RT 35 HC, Stearina vegetal y cera de soja de los que se obtuvo sus características principales siendo reflejadas en la Tabla 3-1:

Propiedades	Rubitherm-RT 35 HC	Estearina vegetal	Cera de soja
Punto de Fusión (°C)	34-36	58-59	51-55
Capacidad calorífica (KJ/kg)	240	-	-
Densidad (kg/l)	0,88	0,862	0,9
Precio (euros/kg)	-	6,95	4,2

Tabla 3-3 Comparativas características principales de los PCM.

La selección de un PCM debe basarse en sus diversas propiedades:

- Propiedades térmicas: se debe considerar la temperatura de fusión en la que trabaja el material de cambio de fase según el ámbito de aplicación. Además, tiene que tener un alto valor de calor latente por unidad de volumen que permita almacenar la energía que se requiera y una alta conductividad térmica tanto en fase líquida como sólida que permita cargar y descargar el sistema de almacenamiento de energía.
- Propiedades económicas: debe ser un material que por su precio sea posible su aplicación en la construcción.
- Propiedades físicas: no debe presentar variaciones de volumen durante el cambio de fase ya que el objetivo es la aplicación en la obra.
- Propiedades cinéticas: alta tasa de nucleación para evitar excesivo enfriamiento en estado líquido.
- Propiedades químicas: el PCM tiene que tener ciclos reversibles de fusión y solidificación completos, así como no ser corrosivo con materiales de construcción ni tóxico. Para aumentar la seguridad, no puede ser inflamable ni explosivo.

Teniendo en cuenta las citadas propiedades de los tres materiales, se ha seleccionado el Rubitherm-RT 35 HC principalmente por las siguientes razones:

- Las densidades de los tres materiales son similares por lo que esta característica no es decisiva en la elección.
- La temperatura de fusión es determinante para la elección del PCM ya que determinará la temperatura a la que el material cambia de fase. Muy importante porque en lo relativo a la aplicación en la construcción se debe seleccionar una temperatura de fusión del PCM dentro del rango de valores que alcanzan las fachadas de las edificaciones durante el año entero o una parte del año [10].
- La cera de soja ha sido descartada debido a que no existe información suficiente acerca de su comportamiento bajo ciclos de fusión y solidificación a pesar de ser un material no contaminante y bajo en precio.
- En estudios y aplicaciones previas en el sector de la construcción y residencial el único material de cambio de fase utilizado hasta hoy en día ha sido el Rubitherm, siendo utilizado otro tipo con un punto de fusión diferente al empleado en este estudio [42] [43] [44].

3.1.3 Realización de la muestra

En primer lugar, se preparó la superficie en la que se iba a trabajar y dejar endurecer las muestras. Para ello, se colocó sobre la superficie de una mesa una lámina de plástico para evitar la adhesión del mortero durante su proceso de solidificación.

El número de unidades que se realizó, de cada tipo de muestra, se estableció en función del número de ensayos al que iban a ser sometidos, así como la geometría de acuerdo con la normativa vigente. En el Anexo VI viene reflejado las unidades para cada ensayo y normativa.

Finalmente, se realizaron las mezclas en tres procesos diferentes según el porcentaje de material de cambio de fase empleado. La metodología para realizar las muestras fue la misma para los tres procesos:

1. Se pesa cantidad de cal hidratada en polvo blanco. Se le añade un contenido de agua del grifo suficiente para conseguir una masa homogénea durante el proceso de amasado.

2. En proporción de la anterior mezcla se añade según las diferentes muestras 5% y 10% de PCM respecto al peso de la anterior mezcla y una muestra sin adición de material de cambio de fase utilizada como referencia.
3. La cantidad de árido se determinó empleando una relación 1:3 en peso con respecto la cal en polvo.
4. Se añade agua hasta conseguir una mezcla con buena trabajabilidad.
5. Se distribuyen las mezclas realizadas en los diferentes moldes, previamente engrasadas las paredes del molde con aceite para desmoldar con mayor facilidad.

En la Tabla 3-4 se puede observar el resumen de la relación de ensayos realizados según la geometría utilizada:

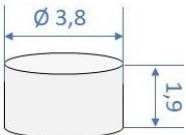
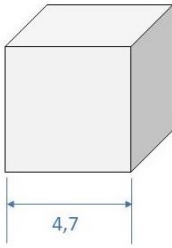
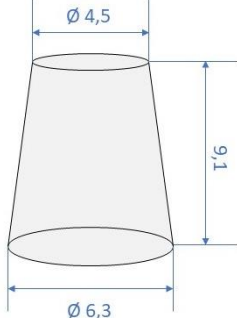
ENSAYOS				
Análisis termogravimétrico		X		
Cámara termográfica FLIR			X	X
Ultrasonidos y anisotropía			X	
Porosidad capilar			X	
Porosidad abierta			X	
Absorción-desorción			X	
Compresión uniaxial	X			
Dureza superficial	X		X	
SEM-EDS		X		

Tabla 3-4 Relación ensayos realizados según geometría.

3.2 Metodología

3.2.1 Análisis de composición química y mineralógica

Carbonatación

En este ensayo se realizarán estudios de carbonatación de tres probetas distintas (referencia, 5% de PCM y 10% de PCM) tres veces, transcurridos 7, 14 y 28 días tras la realización del mortero en los que analizaremos la variación de masa y las temperaturas. En este trabajo se estudiará la carbonatación mediante dos procesos diferentes, mediante el uso de fenolftaleína y el análisis termogravimétrico (TGA) y análisis de diferencia térmica (DTA). Además, también se analiza el grado de carbonatación del mortero de cal de partida con el que se confeccionaron las muestras.

Para este ensayo se utilizará con el equipo TG Labsys Evo cuyas principales características son la temperatura máxima del horno (1150° C) y el rango de variación de temperaturas se encuentra entre 0.001 y 100°C/min. La ficha de especificaciones técnicas se encuentra reflejada en el Anexo IV.

El análisis termogravimétrico (TGA) es una técnica utilizada para determinar la pérdida o ganancia de masa de una muestra en función de la temperatura a la que ha sido programada bajo una atmósfera controlada. El registro de la muestra está realizado respecto el tiempo y temperatura.

La pérdida de masa puede ser debida a diferentes procesos como deshidratación, pirólisis, descomposición, evaporación, etc.

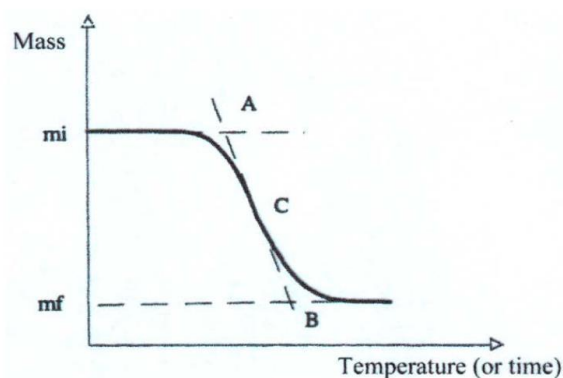


Figura 3-2 Pérdida de masa analizada mediante TG [45].

En cambio, la ganancia de masa se debe a procesos como la absorción, hidratación, etc.

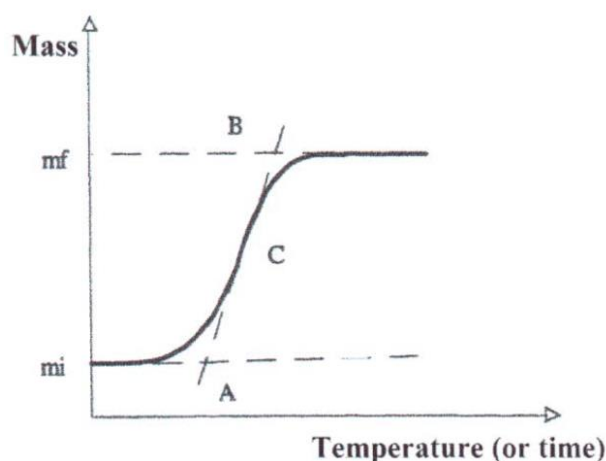


Figura 3-3 Ganancia de masa analizada mediante TG [45]

En el equipo Labsys Evo 1180 se programan los ciclos a los que serán sometidas las muestras del mortero. Consta de dos softwares diferentes, 'Acquisition' en el que se programan los ciclos de calentamiento y enfriamiento teniendo en cuenta la temperatura inicial y final, velocidad de calentamiento y enfriamiento, refrigeración, gas utilizado y número de repetición de ciclos y el otro, 'Processing' utilizado para el procesamiento y análisis de los datos obtenidos del software anterior. Permite obtener diferentes conclusiones como variaciones de masa, temperaturas, flujos de calor, etc.

En el presente trabajo se realizará en el software la programación de un ciclo con las siguientes características:

- Temperatura inicial y final: 30°C.
- Temperatura máxima que alcanza el horno: 800°C.
- Velocidad de calentamiento: 3°C/minuto.
- Velocidad enfriamiento: 10°C/minuto.
- Gas utilizado: nitrógeno.
- Número de ciclos: 1.
- Duración del ciclo total: 5 horas 45 minutos.

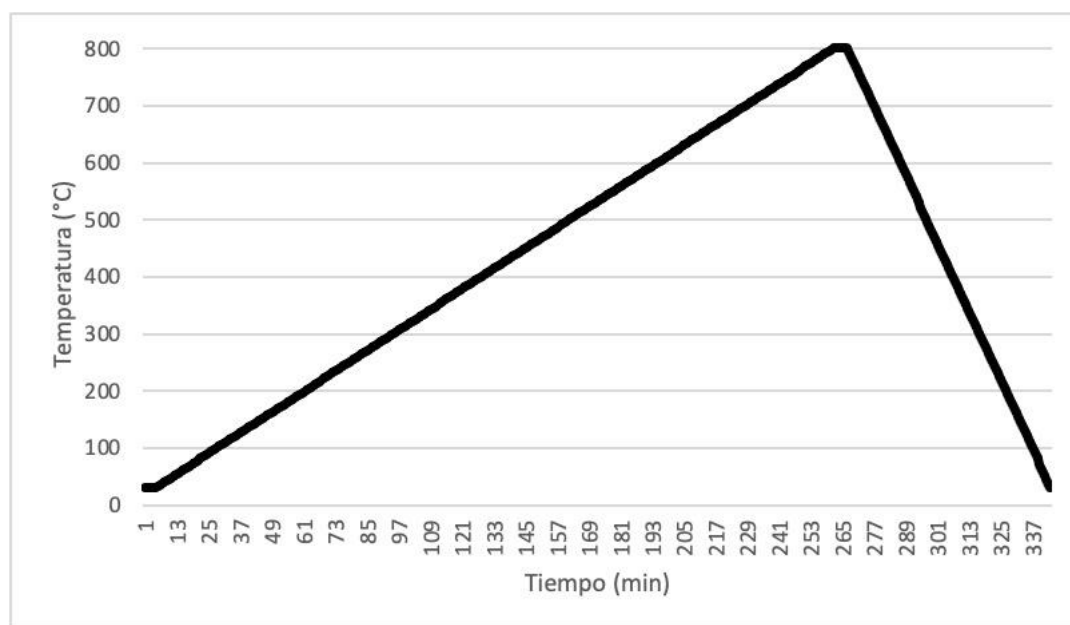


Figura 3-4 Ciclo de tres tramos programado en el TG.

Como se puede observar en la gráfica que aparece en la Figura 3-4, el ciclo está compuesto por tres tramos. El primero de ellos de calentamiento durante 300 segundos hasta alcanzar el horno la máxima temperatura seleccionada (de 30°C a 800°C) aumentando a 3°C/min, un tramo de estabilización (300 segundos) a temperatura constante y un último tramo de enfriamiento en el que la temperatura final es de 30°C en el que se va reduciendo la temperatura 10°C/min.



Figura 3-5 . Equipo Labsys Evo 1180 usado para programar ciclo en el TG para analizar variación de masa.

El grado de carbonatación se determina sobre la muestra de aglutinante, por lo que previamente se debe tamizar el material del núcleo a fin de eliminar de la muestra el árido. Posteriormente, se llevará a cabo el siguiente procedimiento:

1. Programar el ciclo seleccionando las características anteriormente mencionadas.
2. Abrir el TG y extraer el crisol (de alúmina) con pinzas.
3. Pesar el crisol de alúmina en la de alta precisión y tarar báscula.
4. Rellenar el crisol hasta un peso entre 8-14 mg.
5. Introducir el crisol en el TG con las pinzas.
6. Cerrar el horno e iniciar ciclo.
7. Una vez finalizado, exportar los datos de Acquisition a Processing.
8. Analizar los datos obtenidos en el software Processing.

Durante la fase de descomposición de los minerales analizados para determinar el grado de carbonatación podemos observar en la gráfica que los datos significativos son [46]:

- La pérdida de agua libre o evaporable entre los 20- 110°C.
- Entre los 120-400°C se produce la pérdida de agua de gel del silicato de calcio hidratado, así como de las fases minoritarias que puede tener el mortero de aluminatos y sulfo-aluminatos.
- En el rango entre 410-530°C la pérdida del agua estructural del hidróxido de calcio $Ca(OH)_2$ que se encuentra en descomposición quedando CaO.
- Entre 550-950°C la pérdida del anhídrido carbónico CO_2 de la calcita $CaCO_3$ que se encuentra en descomposición y que se formó durante la carbonatación. El CO_2 se desprende en forma de gas.

Para evaluar la evolución de las reacciones de carbonatación e hidratación durante el tiempo de curado, se determina el consumo de portlandita en la reacción de carbonatación y en la reacción puzolánica utilizándose las pérdidas de peso obtenidas por el análisis de TG. Las ecuaciones utilizadas para hallar el grado de carbonatación son las siguientes:

$$C_{free} = (WL_{Ca(OH)_2} \times MM_{Ca(OH)_2}) / MM_{H_2O}$$

$$C_{carbonation} = (WL_{CO_2} \times MM_{CaCO_3}) / MM_{CO_2}$$

$$C_{carbonation/formed} = (C_{carbonation} - xC_{initial/lime})$$

$$C_{carbonation/consumption} = (C_{carbonation/formed} / C_{initial/lime})$$

donde, C es utilizado para el contenido, C_{free} es utilizado de portlandita liberada que no está involucrada en ninguna reacción, $C_{carbonation}$ es la cantidad de portlandita consumida durante las reacciones de carbonatación, MM es la masa molar y $C_{initial/lime}$ es el contenido de portlandita inicial.

Para complementar el estudio de carbonatación de una manera más visual, se comprobará la carbonatación mediante la aplicación de fenolftaleína al 1% en tres probetas cilíndricas de diferentes dosificaciones (referencia, 5% de PCM y 10% de PCM) a los doce días y una vez transcurridos los 28 días de endurecimiento. Esta prueba es un indicador de alcalinidad, ya que al aplicarlo sobre el material se pueden diferenciar tres zonas según su pH. Cuando el pH es inferior a 8 el color que toma es el color del material humedecido (incoloro). En cambio, cuando está entre 8 y 9,5 el color que adquiere es un color rosado claro, y cuando es mayor de 9,5 toma un color rojo púrpura intenso. Cuando se encuentra con un pH inferior a 8 se denomina ‘profundidad de carbonatación’.

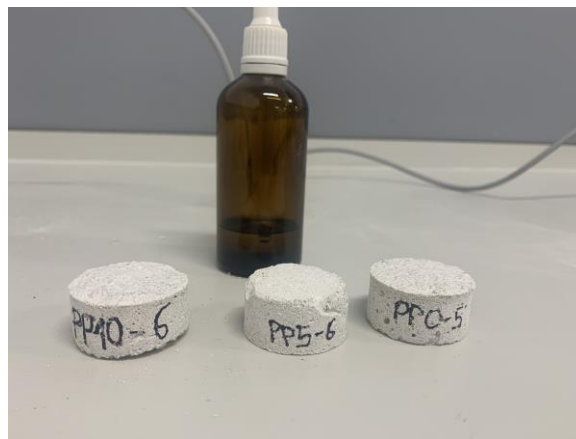


Figura 3-6 Muestras de mortero. De izquierda a derecha PCM 10%, PCM 5% y sin PCM.

Este ensayo viene recogido en la Norma UNE 112-011-11. El procedimiento llevado a cabo mediante la rotura de las muestras por mitad, retirando el polvo producido y una posterior aplicación de fenolftaleína al 1% en alcohol etílico dando lugar a los colores anteriormente mencionados.

3.2.1 Estructura porosa

El movimiento de agua que se produce en el interior de un material poroso se encuentra controlado e influenciado por fuerzas que dependen del tamaño de los poros por los que discurre el agua [47]. Se diferencian tres principales mecanismos de movimiento de agua: la absorción, la capilaridad y la gravedad.

Porosidad accesible al agua

El método utilizado para hallar la estructura porosa abierta y total de la piedra natural, así como la determinación de la densidad real y aparente vienen recogidos en la Norma UNE EN 1936:2007.

Durante este ensayo se utilizaron nueve probetas (tres de cada tipo de muestra) las cuales tienen forma cúbica, como viene recogido en la norma, con un volumen aparente mínimo de 60 ml. Para el inicio del ensayo se deben secar en una estufa a $(70 \pm 5)^\circ\text{C}$ hasta que la masa sea constante (M_d).

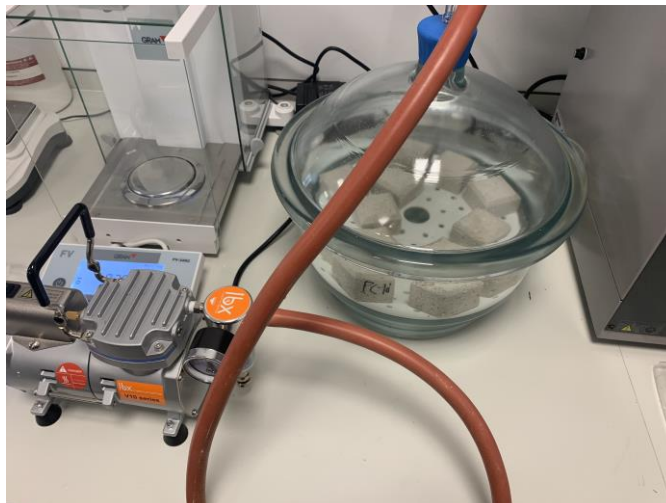


Figura 3-7 Ensayo de porosidad capilar con compresor para hacer el vacío dentro de la cubeta.

El procedimiento para hallar la porosidad abierta y densidad aparente es el siguiente [48]:

1. Pesar las probetas (m_d) y colocarlas en un recipiente de vacío en el cual se vaya disminuyendo la presión hasta $(2,0 \pm 0,7)$ KPa = (15 ± 5) mm Hg y mantener la presión constante durante 2 horas para eliminar todo el aire que contengan los poros abiertos de las probetas.
2. Introducir agua a una temperatura de $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ en el recipiente. Durante este periodo de tiempo la presión debe mantener a la presión constante anteriormente mencionada.
3. Una vez todas las probetas están sumergidas, restablecemos la presión atmosférica en el recipiente dejando las probetas sumergidas durante 5 h a presión atmosférica.
4. Finalmente se pesa la probeta bajo el agua (m_h) y se seca rápidamente con un trapo húmedo para determinar la masa m_s de la probeta saturada debajo del agua.

La densidad aparente es determinada de acuerdo a la norma UNE-EN 1015-10 utilizando la siguiente ecuación:

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

donde, M_d es el peso de la muestra tras ser secada y V_B es el volumen aparente.

Para determinar la porosidad abierta (porcentaje) se calculará mediante la siguiente ecuación:

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

donde, m_s es el peso de la probeta saturada (g), m_d es el peso de la probeta seca (g), ρ_o es la porosidad abierta de la probeta (%) y m_h es masa de la probeta sumergida.

Absorción y desorción

La absorción se produce cuando el agua penetra en fase líquida a través de la red porosa del mortero. El agua se introduce a través de los poros, grietas, roturas, discontinuidades o microfisuras de la estructura del poro. El agua ejerce presión para penetrar en los poros del mortero frente al aire que contiene el interior del material.



Figura 3-8 Ensayo de absorción . Se muestran nueve muestras en inmersión.

El proceso seguido para la realización de este ensayo y que viene recogido en la Norma UNE EN 1936:2007 es el siguiente:

1. Previamente meter muestras en estufa a 70° C hasta obtener masa constante. Obtener peso inicial.
2. Colocar una superficie (cubo) con apoyos en la base inferior para que el agua pueda penetrar en la cara inferior de las probetas cúbicas y añadir agua hasta que cubra por completo las probetas.
3. Sumergir las probetas de las tres diferentes dosificaciones en agua.
4. Antes de realizar la medición, secar superficie exterior ligeramente con un paño húmedo. Realizar mediciones de peso cada 1, 3, 5, 10, 15, 60, 480 y 1440 minutos. Si no se obtiene peso constante continuar tomando mediciones diariamente cada 24 horas.
5. Realizar gráfica de absorción y desorción

El proceso de desorción consiste en calcular la variación de masa de las probetas cúbicas tras ser sometidas al ensayo de absorción de agua. Para ello se seguirá el procedimiento según normativa Norma UNE EN 1936:2007.



Figura 3-9 Ensayo de desorción de las nueve muestras analizadas.

El procedimiento que se seguirá es en siguiente:

1. Retirar las muestras del ensayo de inmersión y se realiza medición de pesos inicial

2. Colocar muestras sobre la superficie con apoyos para permitir desorción de la cara inferior de las muestras.
3. Medir pesos según los siguientes intervalos de tiempo: 1, 3, 5, 10, 15, 60, 480 y 1440. A partir del primer día si no se ha obtenido una masa constante continuar diariamente con las mediciones cada 24 horas.
4. Realizar gráfica de desorción.

Porosidad accesible al mercurio, distribución porosimétrica y tortuosidad

La técnica de porosimetría de intrusión de mercurio (MIT) es utilizada para determinar el tamaño, densidad, distribución y volumen de los poros de un material. Está basada en la relación entre la presión aplicada al introducir mercurio (Hg) en el interior de los poros y el tamaño de los mismos.

En este trabajo se utilizará el porosímetro de Micromeritics (Auto Pore IV 9500), el cual trabaja sobre muestras de 1 cm³. Dispone de dos tipos de rangos de presiones: el primero, de baja presión, de 14 y 200 KPa y el segundo, de alta presión, de 0,20 a 225 MPa realizando la medición de poros de un diámetro comprendido entre 360 μm y 3,8 nm [22].

Este proceso consiste en ir aumentando de forma gradual la presión desde el vacío. Cada vez que es aumentada la presión, se toma el volumen de mercurio que ha sido introducido en el sólido. Utilizando la ecuación de Washburn (1921) hallamos el radio del poro que corresponde con el volumen de mercurio introducido a una determinada presión. La presión requerida para que el mercurio penetre en los poros es inversamente proporcional a la apertura de los mismos. También podemos calcular mediante un análisis rápido y preciso la distribución de tamaño de poro, volumen total del poro, área superficial del poro, diámetro medio del poro y densidades de la muestra, tanto aparente como total [49].

$$p = \frac{2\sigma \cos\theta}{r}$$

donde σ (480 erg.cm⁻²) es la tensión superficial del mercurio y θ (130°) el ángulo de contacto entre el mercurio y la superficie del poro [50].

La caracterización de la porosidad mediante intrusión de mercurio se llevará a cabo en el Instituto de Geociencias de Madrid, donde serán enviadas muestras para su análisis mediante el empleo del porosímetro de Micromeritics (Auto Pore IV 9500). Con los datos obtenidos se determinará la distribución de cada mortero y la tortuosidad de la red porosa.



Figura 3-10 Equipo AutoPore IV 9500 usado en el ensayo de porosimetría de Hg [49].

La tortuosidad es la propiedad utilizada para describir el movimiento del fluido a través de un medio poroso. Está relacionado con la distribución, tamaño y forma del grano. Es la encargada de medir la complejidad geométrica dentro del medio poroso estudiado. Viene definida por la siguiente ecuación:

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

siendo, V_i representa el volumen total de mercurio introducido (mL/g) y V_e es el volumen de mercurio extraído (mL/g).

Cabe destacar que la tortuosidad es medida en el plano perpendicular al movimiento de avance del fluido. Es por ello que no se obtendrá un valor de tortuosidad, si no el orden de la posición en la que están dispuestos los capilares.

Porosidad capilar

El transporte capilar en el interior de los materiales pétreos que son utilizados en el sector de la construcción es el principal mecanismo de movimiento de agua de las disoluciones salinas o de salmuera. Esto se debe a que en la mayoría de edificaciones de la construcción se produce un ascenso de agua a través de los cimientos, fachadas y muros que se encuentran en contacto con el suelo y a la intemperie.

La capilaridad es un fenómeno que es producido por el efecto de la succión en materiales porosos, penetrando agua en el interior del mortero. La profundidad a la que penetrará el líquido (agua) depende del diámetro de los poros, así como la evaporación que se produzca en la superficie externa. Por lo que no es más que la variación de líquido que se produce en el interior de los poros del material que se encuentra ligeramente sumergido según normativa. La variación es causada por fuerzas en la interfase entre sustancias líquidas, sólidas y gaseosas que se encuentran en contacto [20]. El movimiento de agua por capilaridad se produce en los poros de diámetro con mayor acceso de $0.1\mu\text{m}$ e inferior a $100\mu\text{m}$ [51]. Cuanto mayor sea el volumen de poros cuyo diámetro de acceso sea menor, mayor será la fuerza de succión por lo que la altura que alcance el frente capilar también aumentará.

Este ensayo se realiza siguiendo las pautas marcadas por la Norma UNE EN 125:1999 que tiene como objeto determinar la cantidad de agua capaz de absorber por capilaridad un material pétreo, siendo en el caso de este trabajo un mortero, así como la velocidad con la que absorbe agua.



Figura 3-11 Ensayo porosidad capilar.

El inicio del ensayo comienza con obtener una masa constante de las seis probetas (dos de referencia, dos con 5% y dos con 10% de PCM) introduciéndolas en una estufa a $(70 \pm 5)^\circ\text{C}$ hasta su secado completo. Después, tras limpiar de polvo la superficie externa de las probetas, una de sus caras debe ser sumergida ($3 \pm 1\text{ mm}$) de manera que las muestras de mortero puedan absorber el agua por su parte

interior, midiéndose la variación de masa en función del tiempo. El procedimiento que será llevado a cabo será el siguiente [52]:

1. Pesar las muestras una vez secadas (m_d) con una balanza que debe tener una precisión de 0,01g. Se calcula el área de la base que se va a sumergir mediante la medición de dos medianas.
2. Colocar muestras sobre la superficie en la que va sumergir (3 ± 1 mm) teniendo apoyos en la base (en nuestro trabajo utilizaremos una red) para que no se encuentre completamente en contacto la superficie sumergida con la superficie del tanque permitiendo la absorción de agua.
3. Iniciar el contador de tiempo. Cada intervalo de tiempo debe ser inicialmente muy corto y posteriormente más largo, sacando la probeta y secando ligeramente la superficie sumergida sobre un paño húmedo, eliminando de esta forma las gotas de agua. Realizar mediciones de peso cada vez que sea sacada la probeta. Tras realizar cada medición debe ser colocada de nuevo la probeta.

Los resultados serán mostrados los datos de la masa de agua absorbida mediante un gráfico, en gramos divididos por el área de la superficie que ha sido sumergida (m^2), en función de la raíz cuadrada del tiempo (s):

$$C = \frac{m_i - m_d}{A}$$

donde, C son el coeficiente de absorción de agua por capilaridad ($\frac{g}{m^2.s^{0.5}}$), m_i son las masas sucesivas de la probeta durante el ensayo (g), m_d es la masa de la probeta una vez secada (g) y A es el área sumergida en agua (m^2), todo ello en función de $\sqrt{t_i}$, siendo los tiempos que han transcurrido desde el inicio hasta el momento en la que se mide la probeta (s). El valor numérico obtenido viene expresado en $kg/(m^2s^{1/2})$.

Ultrasonidos y anisotropía

Los ultrasonidos es un método de análisis portátil y no destructivo, en el que las ondas ultrasónicas de 2 kHz de frecuencia se propagan a través de sólidos, líquido y gases. Se mide el tiempo que tarda una onda en viajar desde el emisor de la misma hasta un receptor, dando gran cantidad de información. Durante este proceso influye desde la mineralogía de la muestra a estudiar (composición y cristalografía), los poros y fisuras, el contenido de humedad o el contenido de sales. La transmisión de la onda será más rápida cuanto mayor sea la cohesión interna de la muestra, disminuyendo la velocidad en materiales deteriorados debido a que el aumento de porosidad disminuye la velocidad de forma exponencial. Al contrario que si hay una mayor resistencia mecánica (la cual también está relacionada con la porosidad), aumentará la velocidad [53].

Esta técnica permite analizar la calidad del material con respecto a su porosidad y otras propiedades mecánicas.

La anisotropía es un parámetro relacionado con heterogeneidad de los materiales pétreos y con el cual se analiza las propiedades de los materiales según la dirección en la que se midan. Este parámetro se relaciona con la porosidad capilar o con ensayos relacionados con cámaras termográficas donde tiene gran importancia la dirección en las que sean estudiadas. Existen dos formas de hallarla propuesta por Guydader y Denis en 1986: el índice de anisotropía total (dM%) y la anisotropía relativa (dm%) [53].

$$dM\% = \left(1 - \left(\frac{2V_{p_{min}}}{V_{p_{max}} + V_{p_{media}}} \right) \right) \times 100$$

$$dm\% = \left(2x \left(\frac{V_{p_{max}} - V_{p_{media}}}{V_{p_{max}} + V_{p_{media}}} \right) \right) \times 100$$

siendo, $V_{p_{max}}$ la máxima velocidad de las ondas, $V_{p_{media}}$ la velocidad media y $V_{p_{min}}$ la velocidad mínima (medición multidireccional).

El resultado de ensayo es aplicado a la orientación profesional del material estudiado en la construcción, aumentando de esta manera su durabilidad y alterabilidad [54].

Análisis composicional mediante SEM-EDS

La Microscopía Electrónica de Barrido con microsonda de SEM-EDS se utiliza para observar e identificar con altas resoluciones de μm y nm las características texturales de diferentes materiales (rocas, cemento, mortero, etc.). Esta técnica permite conocer la compleja estructura y composición permitiendo diferenciar las zonas con mayor carbonatación, así como las zonas no carbonatadas.

El funcionamiento de la microscopía electrónica de barrido (SEM) radica en la focalización de un haz de electrones de alta energía, emitidos por un cátodo de tungsteno a través de una columna en la que se ha hecho el vacío, y barrido en la superficie de la muestra a estudiar. Para ello, se utilizan lentes cuya función es ampliar y enfocar el haz y bobinas encargadas de realizar el movimiento por la superficie. El haz focalizado realiza un barrido sobre la superficie y a su vez, un detector va contando el número de electrones clasificados como electrones secundarios con baja energía recogidos por colector o contador de centelleo. El detector modula la intensidad del haz de electrones moviéndose a su vez sobre la pantalla y al mismo tiempo que el haz de electrones clasificados de alta energía, dando lugar la imagen [55] [56].

Drilling Resistance Measurement System (DRMS)

El sistema de medición de resistencia a la perforación es un dispositivo el cual ha sido diseñado para realizar mediciones de resistencia a la perforación a través de la profundidad de los materiales. Para ello se perfora un orificio sobre el material a velocidad de rotación constante (rpm) y velocidad de avance lateral (mm/min). Se realizan mediciones de fuerza y perfil de fuerza que permiten establecer una correspondencia entre la fuerza de perforación y el diámetro de la broca, por lo que los resultados que se obtienen pueden ser relacionados directamente aún utilizándose brocas de diámetros diferentes. La resistencia a la perforación y los valores de UCS se pueden relacionar mediante la escala de dureza de Mohs.

El procedimiento que se sigue es en primer lugar el calibrado de los materiales a utilizar. Posteriormente se aplican fuerzas de corrección sobre las fuerzas de perforación medidas y basadas en la longitud de la perforación y del valor de la resistencia del primer orificio realizado. En las mediciones que se realizan se utilizan normalmente brocas de 5, 7 o 10mm de diámetro según la dureza de material (en caso de querer aumentar sensibilidad para materiales blandos se utilizan las de mayor diámetro). El equipo utilizado tiene una fuerza limitada de 100N por lo que en ocasiones no puede medir materiales muy duros. Por ello, utilizando diferentes diámetros se logra la optimización de medida del DRMS. El efecto del desgaste es un dato a considerar al analizar piedras abrasivas o en el caso de este trabajo de morteros de cal, ya que la resistencia a la perforación aumenta durante la vida útil [57].

Para analizar los datos obtenidos del diagnóstico de DRMS es necesario realizar un análisis estadístico de los datos. El objetivo principal es la validación de la curva de correlación entre los datos de la resistencia a la compresión y los datos de resistencia a compresión. También es capaz de detectar las fluctuaciones durante la resistencia que ejerce el material a la perforación por parte de la broca. Las fluctuaciones una vez analizadas pueden ser atribuidas a la no homogeneidad del material, diferentes tamaños de grano y resistencia de grano, fisuras (micro y macro) y detectar diferentes capas de sedimentación.

3.2.2 Propiedades de resistencia mecánica

Resistencia al impacto

La dureza es la capacidad que es capaz de resistir un material tras la penetración de una aguja o impacto de un material sobre su superficie. Se realiza análisis de la resistencia al impacto mediante el uso de un durómetro Leeb PCE-2500 portátil, cuya técnica es la esclerometría que consiste en el lanzamiento de un cuerpo que impacta con una determinada fuerza sobre la superficie a medir, produciéndose un rebote del cuerpo de impacto con una energía específica y una velocidad, produciendo una deformación en la superficie provocada principalmente por la pérdida de energía cinética.

El objetivo de este ensayo es determinar si la adición de materiales de cambio de fase en diferentes proporciones afecta a la propiedad de la dureza superficial de los morteros de cal.

Se pueden obtener algunas propiedades mecánicas importantes a partir de la dureza superficial como la resistencia a compresión uniaxial. La ecuación que relaciona de la resistencia a compresión uniaxial (UCS) con la dureza Leeb fue desarrollada inicialmente por los estudios de Verwall y Mulder. Posteriormente, Aoki y Matsukura (2008) añadieron la porosidad dando datos más precisos [53] [58]

$$UCS \text{ (MPa)} = 0.079e^{-0.039n}L_s^{1.1}$$

donde, n es la porosidad (porcentaje accesible al mercurio [22] o agua) y L_s es el valor de la dureza de Leeb.

Para la realización de este ensayo se realizará mediante mediciones aleatorias por la superficie de las seis muestras cúbicas (dos de cada tipo de proporción: referencia, 5% de PCM y 10% de PCM) con apoyo sobre superficie fija a la hora de realizar la medición, anotando los valores para analizarlos junto a los valores de porosidad.

Resistencia a la compresión uniaxial

Los ensayos a compresión vienen recogidos en la Norma UNE-EN 12390-3:2020, en la cual se recoge el procedimiento de las probetas que serán sometidas a esfuerzos de compresión hasta la rotura en una máquina de ensayo de compresión recogida en la Norma EN 12390-4.

Las probetas que se utilizarán deben ser cúbicas, cilíndricas o muestras que cumplan las normas EN 12350-1, EN 12390-1, EN 12504-1. Las dimensiones deberán estar normalizadas por la Norma EN 12390-1 o según procedimiento del anexo B donde se describe el procedimiento para probetas de dimensiones no normalizadas.



Datos técnicos

- Fuerza de comprobación: máx. 20kN
 Carrera: máx. 44mm
 Espacio libre para montaje de probetas: 165x65mm
 16 probetas de tracción
 ■ material: 4x Al, 4x Cu, 4x St, 4x CuZn
 16 probetas de dureza
 ■ LxAnxAl: 30x30x10mm
 ■ material: 4x Al, 4x Cu, 4x St, 4x CuZn
 Bola para ensayo de dureza: Ø 10mm
- Rangos de medición
 ■ fuerza: 0...20kN, graduación: 0,5kN
 ■ recorrido: 0...20mm, graduación: 0,01mm

Figura 3-12 WP 300 (Gunt Hamburg): ensayo de materiales a compresión.

El ensayo comienza con la preparación y posicionamiento de las probetas. En la realización de este trabajo en las zonas de contacto y donde se realizará la carga sobre la probeta, se coloca neopreno con la finalidad de reducir posibles imperfecciones de la cara externa de contacto con la pieza de compresión y placa de presión. Las probetas deben ser colocadas de tal forma que la aplicación de la fuerza ejercida por la máquina sea en la dirección perpendicular a la dirección del hormigonado y quedando centradas respecto a la pieza de compresión.

La carga a la que será sometida la probeta se selecciona mediante el volante, siguiendo la velocidad de carga que estará entre 0,2MPa/s a 1MPa/s. La carga es aplicada sobre la probeta sin choques e incrementándose a una velocidad seleccionada de $\pm 10\%$ hasta alcanzar el límite. Una vez se llegue a la carga máxima ejercida hasta la rotura de la muestra se anotará el valor marcado por el agua de referencia (roja) del dinamómetro. La resistencia a la compresión viene dada por la siguiente ecuación [59]:

$$f = \frac{F}{A_c}$$

donde, f_c es la resistencia a la compresión (MPa), F es la carga máxima en rotura (N) y A_c es el área de la probeta sobre la que actúa la fuerza de compresión.

En las Figura 3-13 y Figura 3-14 se observa las diferentes roturas que se pueden producir al aplicar la carga máxima. Se diferencia entre dos tipos de roturas: roturas satisfactorias y no satisfactorias que se recogen en la Norma UNE-EN 12390-3:2020.

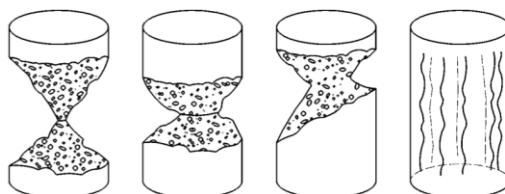


Figura 3-13 Roturas satisfactorias según Norma UNE-EN 12390-3:2020 [59]

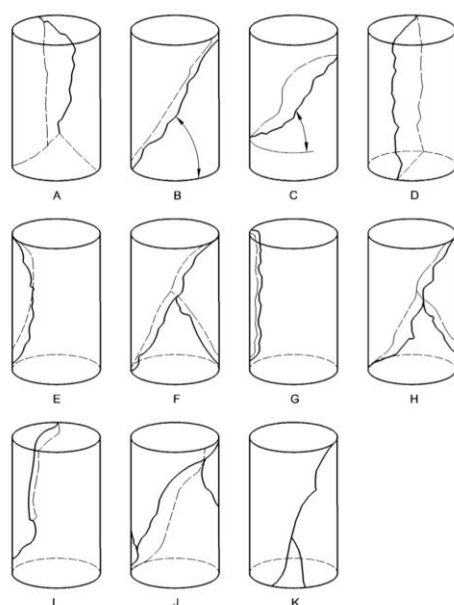


Figura 3-14 Roturas no satisfactorias según Norma UNE-EN 12390-3:2020 [59]

La realización del ensayo se realiza sobre la mesa donde está colocado el equipo de ensayo, con un ordenador donde mediante una hoja de Excel se van registrando los datos obtenidos en el medidor de fuerza aplicada, obteniendo una gráfica de tensión de deformación de cada una de las probetas a las que se le aplica el ensayo.

El procedimiento que se llevará a cabo será:

- Colocar probeta centrada y girar volante hasta que la pieza de compresión esté en contacto con la pieza.
- Comenzar a girar volante de forma gradual, aumentando la carga aplicada hasta rotura.
- Anotar valor de rotura y tomar fotografía para comprobación de satisfacción de rotura.
- Determinar la UCS aplicando la siguiente fórmula y relacionarla con la dureza superficial obtenida:

$$R = \frac{F}{A}$$

siendo, F la fuerza aplicada (N) y A el área de la probeta (m^2).

3.2.3 Capacidad de retención de calor mediante cámara termográfica

La cámara termográfica se trata de un ensayo no destructivo utilizado para determina la cantidad de radiación infrarroja que es emitida por un cuerpo. Para que se emita radiación el cuerpo debe superar el cero absoluto ($-273^{\circ}C$) siendo mayor cuanto más alta es la temperatura. En este trabajaremos con la cámara FLIR, ya que se necesitará de una fuente externa de calor, en este caso se tratará de las muestras de mortero calentadas en una estufa. Se obtienen datos cuantitativos, como el valor de la temperatura del objeto y datos cualitativas que serán obtenidos mediante la comparación de las tres muestras diferentes con diferentes dosificaciones de PCM.

El comportamiento térmico de un material esta influenciado por diferentes factores como la densidad, el calor específico y la capacidad de acumular calor (que está relacionado con el volumen). Cuanto mayor o menor sean estos factores, la capacidad de acumular calor del cuerpo aumentará o disminuirá según la temperatura externa a la que se encuentre y será capaz de mantener ese calor más o menos tiempo.

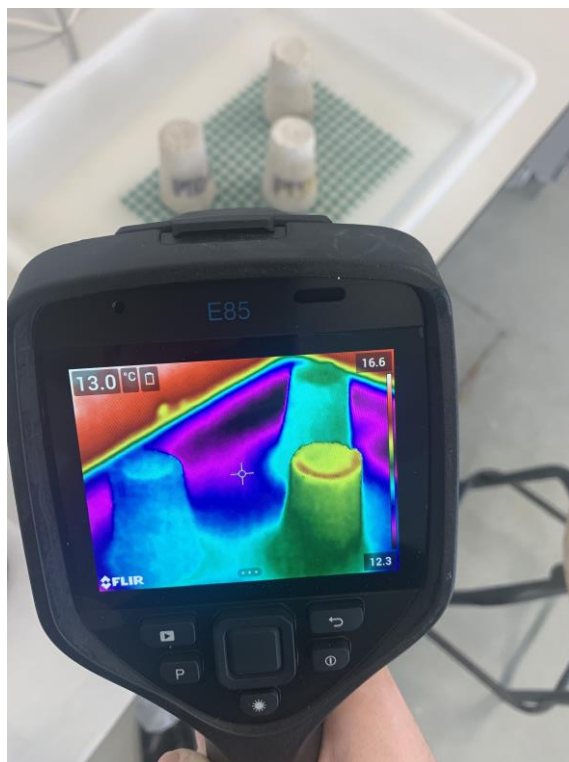


Figura 3-15 Ensayo de enfriamiento de muestras mediante cámara termográfica FLIR.

Los procedimientos que se llevarán a cabo para la realización de este ensayo son los siguientes:

Ensayo de calentamiento

1. Las muestras son introducidas en un frigorífico hasta alcanzar 1,5 °C.
2. Se calienta agua 34 °C en un recipiente.
3. Se colocan las muestras sobre una superficie con apoyos para que permita absorber agua y se incorpora el agua caliente.
4. Realizar mediciones de temperatura con la cámara FLIR (1, 3, 5, 10 y 15 minutos)
5. Analizar resultados.

Ensayo de enfriamiento

1. Las muestras son calentadas a 70°C, punto por encima de su punto de fusión.
2. Se vierte el agua enfriada a 1,7°C en un recipiente y se sumergen 3mm las muestras.
3. Mediante la cámara FLIR observar la temperatura de las muestras.
4. Realizar medición cada minuto durante los primeros quince minutos.
5. Analizar resultados

4 RESULTADOS

4.1 Grado de carbonatación

Se presentan en este apartado los resultados obtenidos de los ensayos de análisis térmico realizado mediante el TG-DTA-DCS. Para ello, se observará de forma general los cambios de entalpía endotérmica y exotérmica, ya que se muestra la capacidad de almacenamiento de energía presentada por las muestras y se centrará el estudio en las variaciones de masa durante los ciclos.

Para proceder al análisis de los resultados previamente se realizará una breve explicación de la leyenda de los gráficos que se mostrarán posteriormente. En la gráfica se observan diferentes líneas de colores las cuales tienen su significado:

- Línea azul: representa las variaciones de flujo de energía. Si la línea se sitúa en los valores positivos, esto significa que es un proceso exotérmico en los que hay una liberación de energía. En cambio, si los valores se sitúan por debajo del cero (valores negativos), se trata de un proceso endotérmico en el que se encuentra absorbiendo energía.
- Línea roja: es la temperatura del horno que irá variando según se haya programado el ciclo.
- Línea verde: indica la variación de masa de la muestra durante el ciclo programado.

Cabe destacar, que durante la representación de los resultados mediante el programa 'Processing', se puede mostrar las líneas del blanco de referencia (crisol de alúmina vacío) para poder realizar comparaciones.

Para realizar la interpretación de los resultados los datos se pueden mostrar de dos formas según lo que se vaya a analizar: el eje de ordenadas es el será el flujo de calor (μV) y el eje de abscisas el tiempo (min) para observar el almacenamiento de calor, en cambio para la variación de masa se utilizará como abscisas la temperatura de la muestra ($^{\circ}C$) y como ordenas la variación de masa (mg).

En primer lugar, observaremos que existen dos zonas las cuales están divididas a partir del valor cero de flujo de calor. Los valores de la línea azul que se encuentran por encima nos representan el proceso exotérmico relacionado con el cambio de fase de solidificación. Los datos por debajo nos representan los valores del proceso endotérmico relacionado con el estado de fusión.

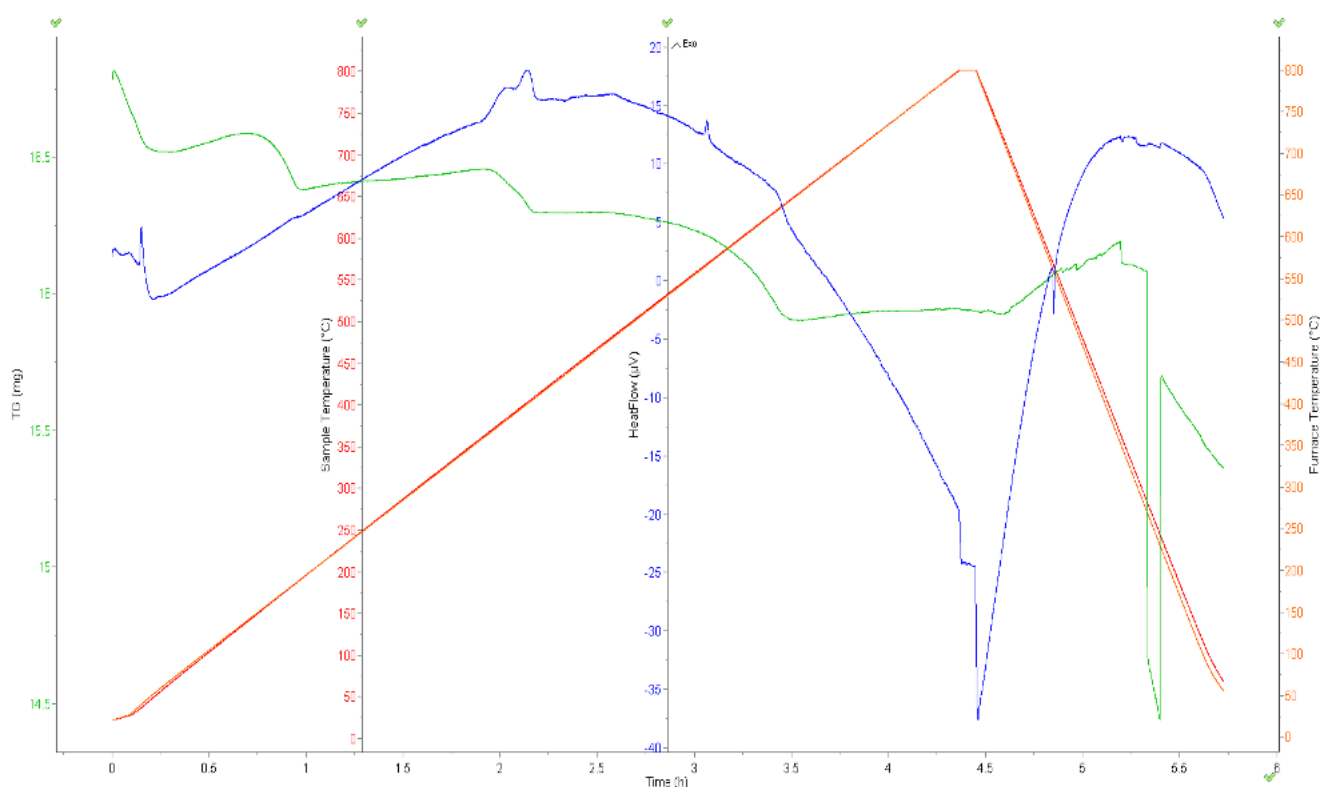


Figura 4-1 Ejemplo de gráfica del PCM10(14) para interpretación de leyenda colores TG.

En el presente trabajo, el objetivo principal es el análisis de la variación de masa durante el ciclo, observando los puntos de la gráfica en los que a una determinada temperatura existe una variación de masa. Analizaremos el ciclo a partir de los 300°C hasta los 800°C, mencionando las variaciones de masa y de temperatura a las que se producen dichas variaciones.

Hay un periodo de tiempo en el que desde el inicio del curado de las muestras existe una variación de peso la cual se debe a dos procesos: la carbonatación y el secado. Este trabajo se centrará en el proceso de carbonatación (reacción de CO_2 con hidróxido de calcio) ya que se asume que el proceso de evaporación de agua ha finalizado. Por lo que las figuras de los datos obtenidos en el análisis termogravimétrico están centradas en el intervalo de temperaturas de 300 a 800°C.

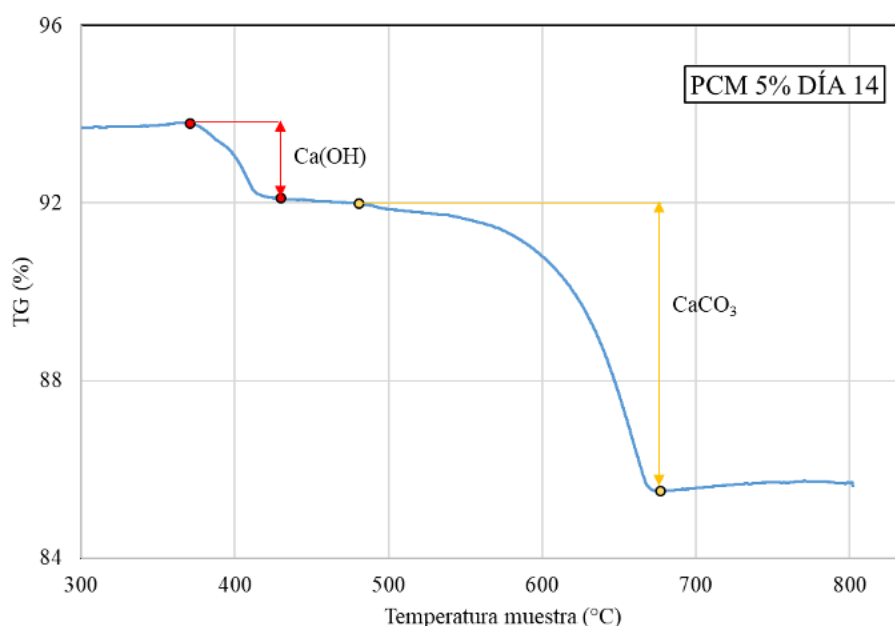


Figura 4-2 Resultado análisis termogravimétrico muestra con 5% de PCM a los 14 días de curación.

En la Figura 4-2 se puede observar a modo resumen las principales pérdidas de masa que tienen lugar durante el ensayo de carbonatación. A partir de los resultados obtenidos en estas gráficas se determinará el grado de carbonatación.

La evolución del grado de carbonatación se recoge en la Figura 4-3:

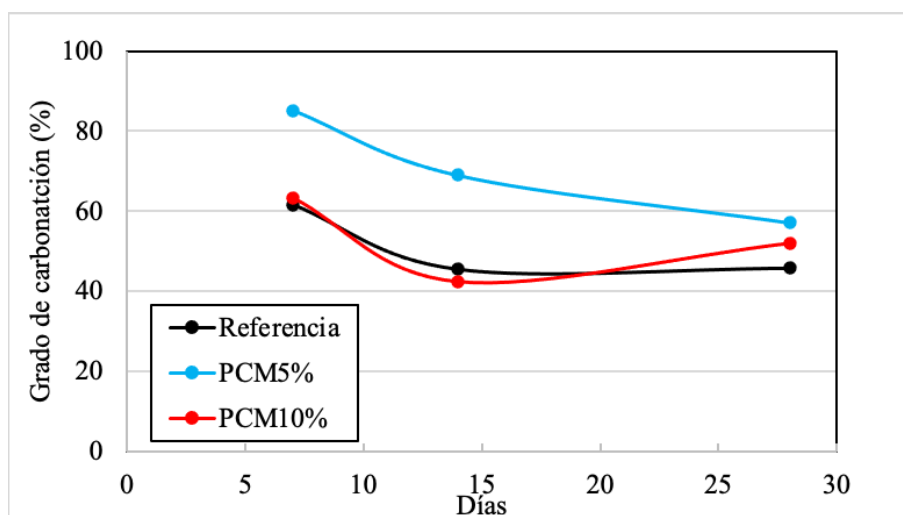


Figura 4-3 Evolución grado de carbonatación de las tres muestras analizadas durante 28 días.

En la Figura 4-3 se muestra la evolución del grado de carbonatación durante los tres análisis realizados (a los 7, 14 y 28 días).

En la Figura 4-4 se muestra los resultados de la muestra de referencia a los siete días de curado. Se observan dos principales variaciones de masa (1 y 2). Los datos de variaciones de masa son mostrados en la Tabla 4-1, en la que se observa que en la primera pérdida de masa de un 1,87% se produce entre 388-424°C. En la segunda variación de masa de un 5,47%, es producida por la descomposición de la calcita $CaCO_3$ por la pérdida de anhídrido carbónico (CO_2). Cabe destacar el pico producido a 425 °C, siendo despreciable ya que se produce una corrección de la variación de masa.

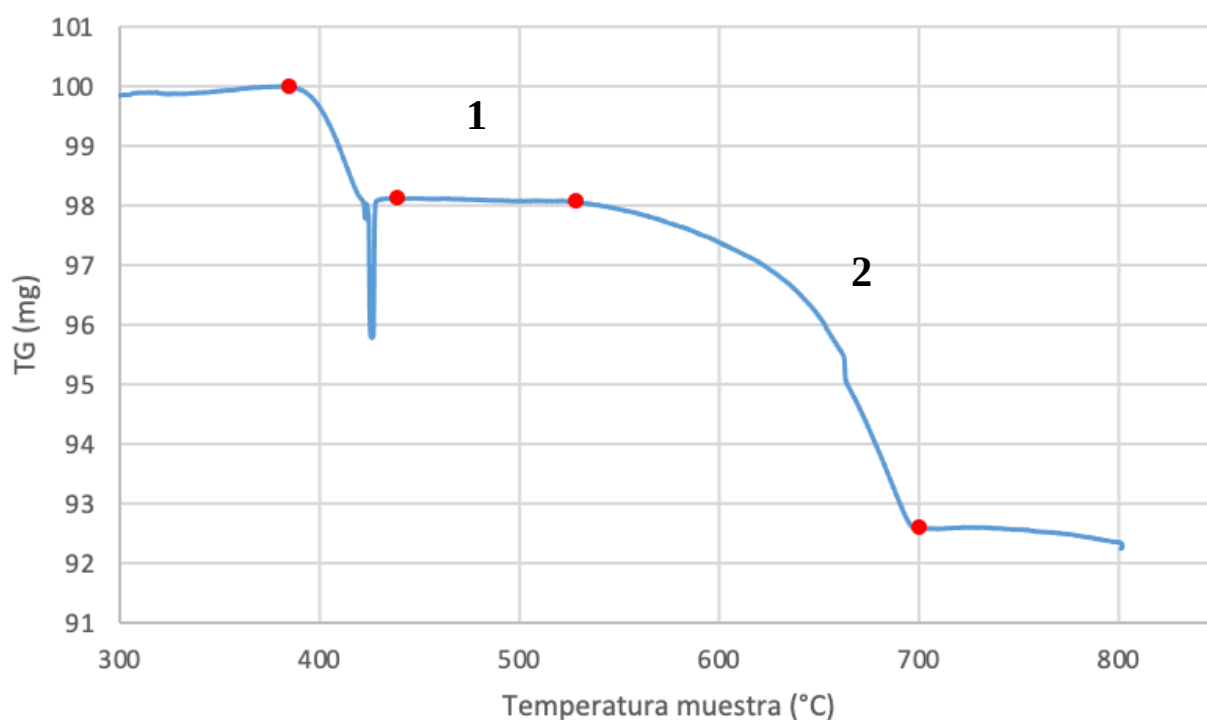


Figura 4-4 Resultado variación masa por análisis TG: muestra sin PCM, día 7.

MUESTRA Peso inicial (mg) Temperatura (°C) Variación de masa (%)
Ref. día 7

1	10,1	388-424	1,87
2	10,1	540-700	5,47

Tabla 4-1 Resultados variación de masa de la muestra de referencia a los 7 días de curado.

En la Figura 4-5 se observan tres variaciones de masa significativas que corresponden a la muestra con un 5% de PCM tras 7 días de curado. En la Tabla 4-2 se puede observar que en la primera variación se produce una ligera variación de masa de un 0,32% en el intervalo entre 382-414°C. A partir de los 515°C se produce la variación más significativa. En último lugar, a los 740°C con una caída brusca de la masa se produce una pequeña variación de masa de un 3,84%, posiblemente producida por una corrección del peso por ser tan brusca la pendiente.

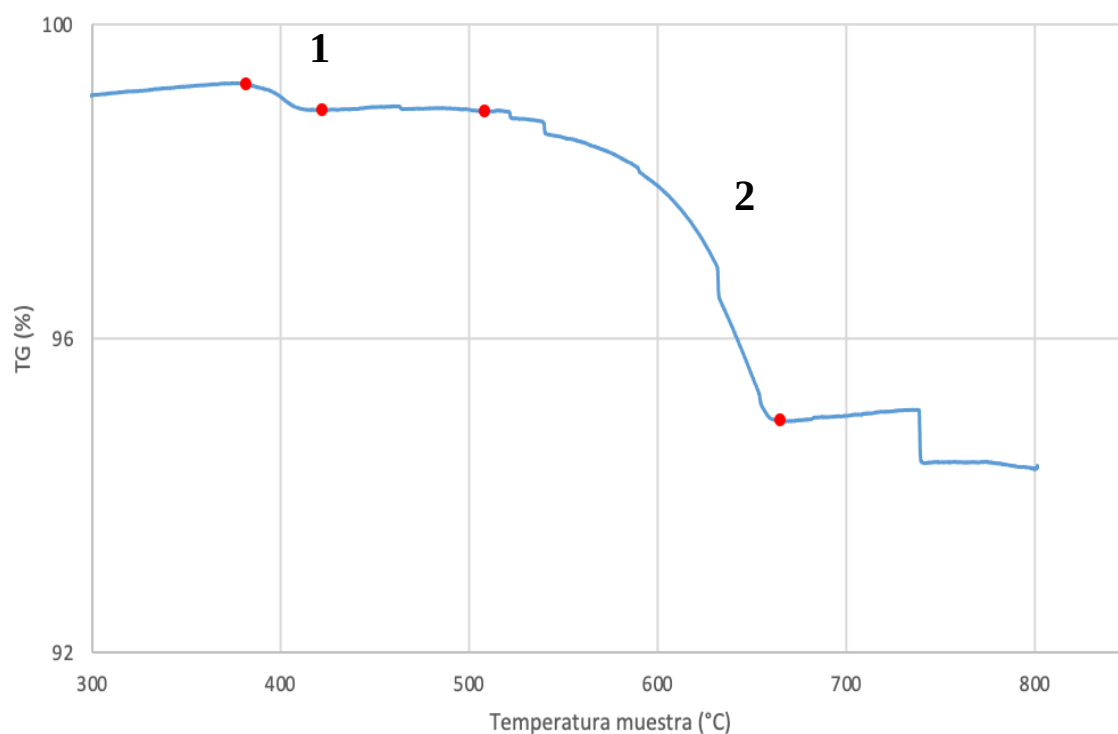


Figura 4-5 Resultado variación masa por análisis TG: muestra con 5% de PCM, día 7.

MUESTRA	Peso inicial (mg)	Temperatura (°C)	Variación de masa (%)
PCM 5% día 7			
1	12,1	382-414	0,32
2	12,1	540- 661	3,84

Tabla 4-2 Resultados variación de masa de la muestra con 5% de PCM a los 7 días de curado.

En la Figura 4-6 se muestra el resultado del análisis termogravimétrico de la muestra con una proporción de 10% de PCM a los 7 días de curado. En la Tabla 4-3 se muestran los resultados de las dos principales variaciones de masa. Se observa que en la primera variación se produce una ligera variación de masa de un 1,66% en el intervalo entre 377-418°C (similar al de 5% de PCM) causada por la pérdida de agua de gel del silicato de calcio hidratado y en menor medida de los aluminatos y sulfo-aluminatos. En la segunda variación se observa una variación de 5,389% de masa entre los 509-674°C, posiblemente producida por la descomposición del carbonato.

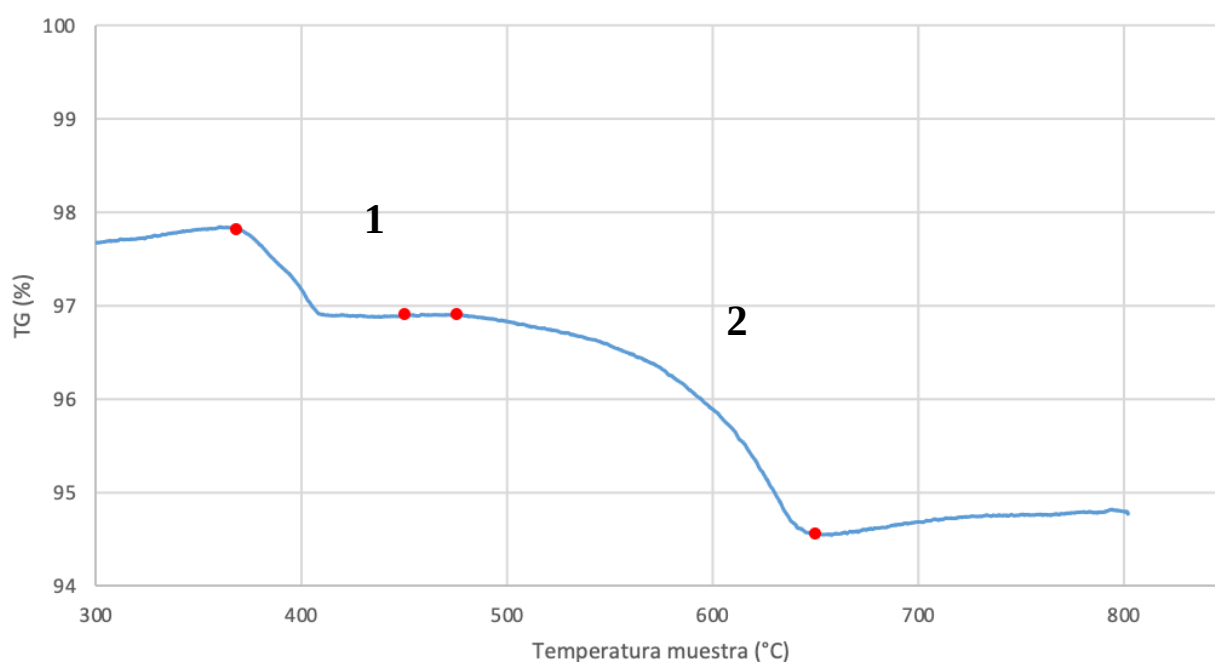


Figura 4-6 Resultado variación masa por análisis TG: muestra con 10% de PCM, día 7.

MUESTRA	Peso inicial (mg)	Temperatura (°C)	Variación de masa (%)
10% PCM día 7			
1	10,7	377-418	1,66
2	10,7	509-674	5,38

Tabla 4-3 Resultados variación de masa de la muestra con 10% de PCM a los 7 días de curado.

En la Figura 4-7 se muestra el resultado del análisis termogravimétrico de la muestra con una proporción de 10% de PCM a los 7 días de curado. En la Tabla 4-4 se muestran los resultados de las dos principales variaciones de masa. Se observa que en la primera variación se produce una ligera variación de masa de un 2,09% en el intervalo entre 377-418°C (similar al de 5% de PCM) causada por la pérdida de agua de gel del silicato de calcio hidratado y en menor medida de los aluminatos y sulfo-aluminatos. En la segunda variación se observa una variación de 5,58% de masa entre los 509-674°C, posiblemente producida por la descomposición del carbonato.

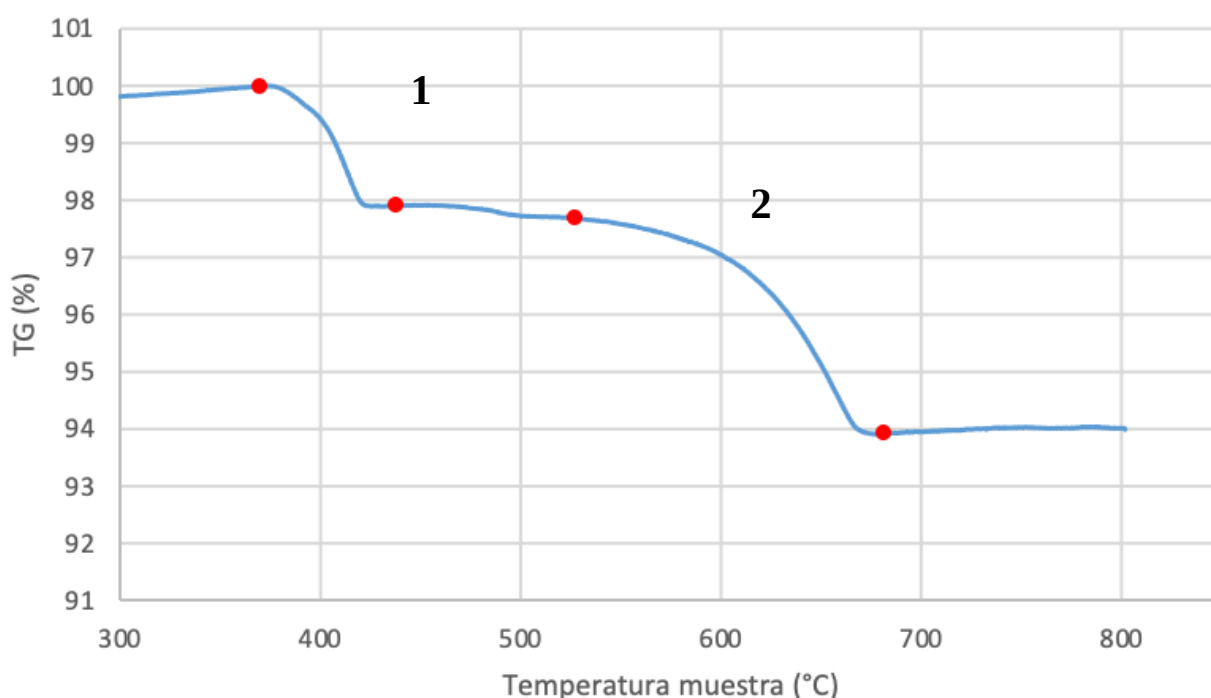


Figura 4-7 Resultado variación masa por análisis TG: muestra sin PCM, día 14.

MUESTRA	Peso inicial (mg)	Temperatura (°C)	Variación de masa (%)
Ref. día 14			

1	13,7	380-420	2,09
2	13,7	500-674	5,58

Tabla 4-4 Resultados variación de masa de la muestra de referencia a los 14 días de curado.

En la Figura 4-8 se muestra el resultado del análisis termogravimétrico de la muestra con una proporción de 5% de PCM a los 14 días de curado. En la Tabla 4-5 se muestran los resultados de las dos principales variaciones de masa. Se observa que en la primera variación se produce una ligera variación de masa de un 1,69% en el intervalo entre 374-414°C (similar a los anteriores gráficos) causada por la pérdida de agua de gel del silicato de calcio hidratado y en menor medida de los aluminatos y sulfoaluminatos. En la segunda variación se observa una variación de 6,473% de masa entre los 532-675°C, posiblemente producida por la descomposición del carbonato.

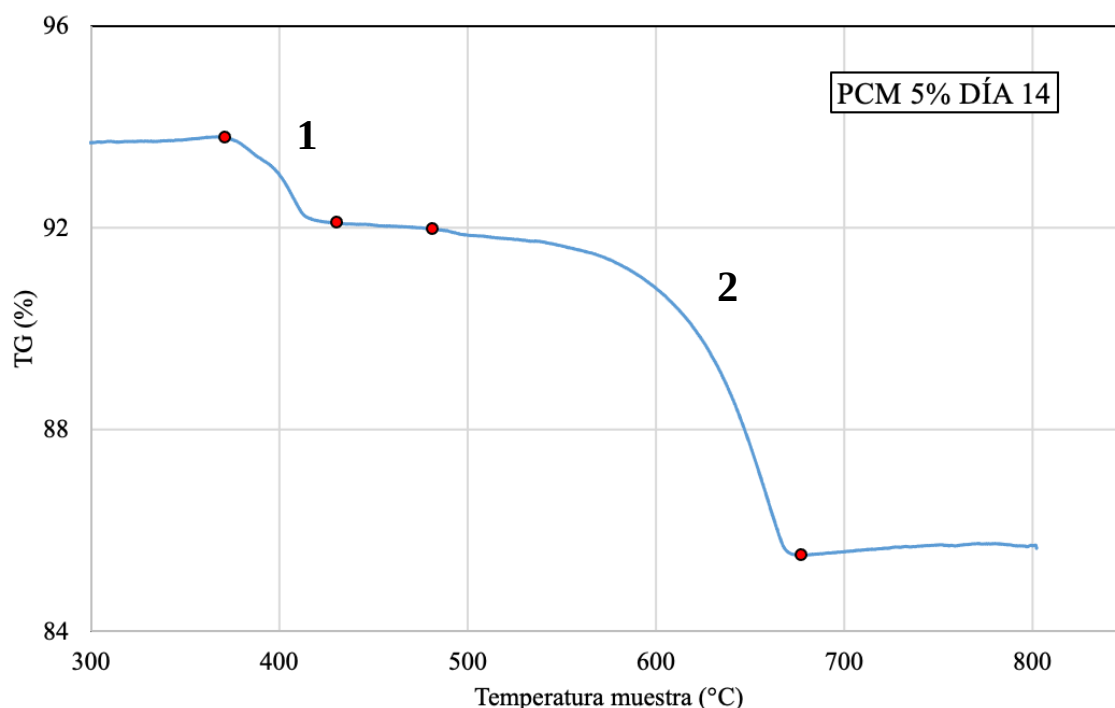


Figura 4-8 Resultado variación masa por análisis TG: muestra con 5% de PCM, día 14.

MUESTRA	Peso inicial (mg)	Temperatura (°C)	Variación de masa (%)
5% PCM día 14			
1	10,2	374-414	1,69
2	10,2	532-675	6,47

Tabla 4-5 Resultados variación de masa de la muestra con 5% de PCM a los 14 días de curado.

En la Figura 4-9 se muestra el resultado del análisis termogravimétrico de la muestra con una proporción de 10% de PCM a los 14 días de curado. En la Tabla 4-6 se muestran los resultados de las dos principales variaciones de masa. Se observa que en la primera variación se produce una ligera variación de masa de un 0,91% en el intervalo entre 371-412°C, causada por la pérdida de agua de gel del silicato de calcio hidratado y en menor medida de los aluminatos y sulfo-aluminatos. En la segunda variación se observa una variación de 2,35% de masa entre los 485-648°C, no pudiendo afirmar por qué es producida esta pérdida de masa, ya que se encuentra en el rango de temperatura de dos procesos distintos.

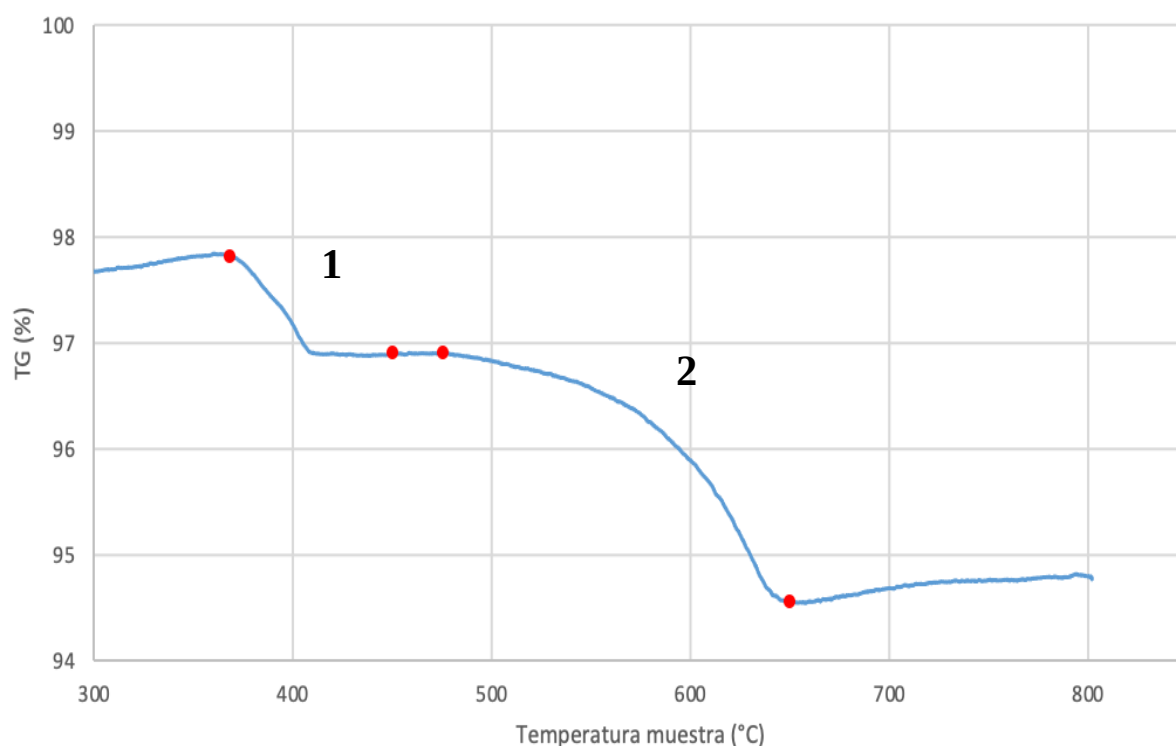


Figura 4-9 Resultado variación masa por análisis TG: muestra con 10% de PCM día 14.

MUESTRA	Peso inicial (mg)	Temperatura (°C)	Variación de masa (%)
10% PCM día 14			
1	12,8	371-412	0,91
2	12,8	485-648	2,35

Tabla 4-6 Resultados variación de masa de la muestra con 10% de PCM a los 14 días de curado.

En la Figura 4-10 se muestra el resultado del análisis termogravimétrico de la muestra de referencia a los 28 días de curado. En la Tabla 4-7 se muestran los resultados de las dos principales variaciones de masa. Se observa que en la primera variación se produce una ligera variación de masa de un 2,25% en el intervalo entre 374-418°C (similar a la primera variación de masa de las anteriores gráficas) causada por la pérdida de agua de gel del silicato de calcio hidratado y en menor medida de los aluminatos y sulfo-aluminatos. En la segunda variación se observa una variación de 3,99% de masa entre los 550-681°C, posiblemente producida por la descomposición del carbonato que se formó durante el proceso de carbonatación.

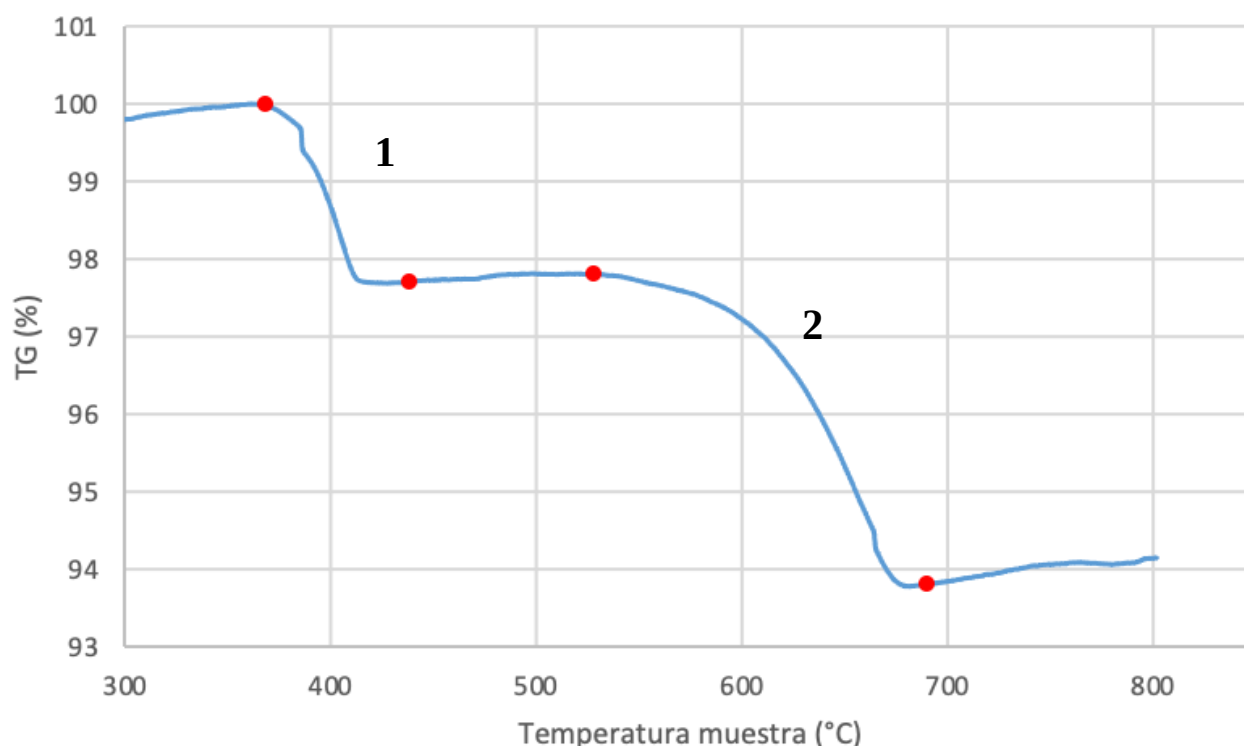


Figura 4-10 Resultado variación masa por análisis TG: muestra sin PCM, día 28.

MUESTRA **Peso inicial (mg)** **Temperatura (°C)** **Variación de masa (%)**
Ref. día 28

1	13	375-415	2,25
2	13	550-681	3,99

Tabla 4-7 Resultados variación de masa de la muestra de referencia a los 28 días de curado.

En la Figura 4-11 se muestra el resultado del análisis termogravimétrico de la muestra con una proporción de 5% de PCM a los 28 días de curado. En la Tabla 4-8 Tabla 4-3 se muestran los resultados de las dos principales variaciones de masa durante este proceso. Se observa que en la primera variación se produce una ligera variación de masa de un 2,62% en el intervalo entre 373-425°C, causada por la pérdida de agua de gel del silicato de calcio hidratado y en menor medida de los aluminatos y sulfoaluminatos. En la segunda variación se observa una variación de 6,68% de masa entre los 541-700°C, posiblemente producida por la descomposición del carbonato formado durante la carbonatación y desprendiéndose del CO₂ en forma de gas.

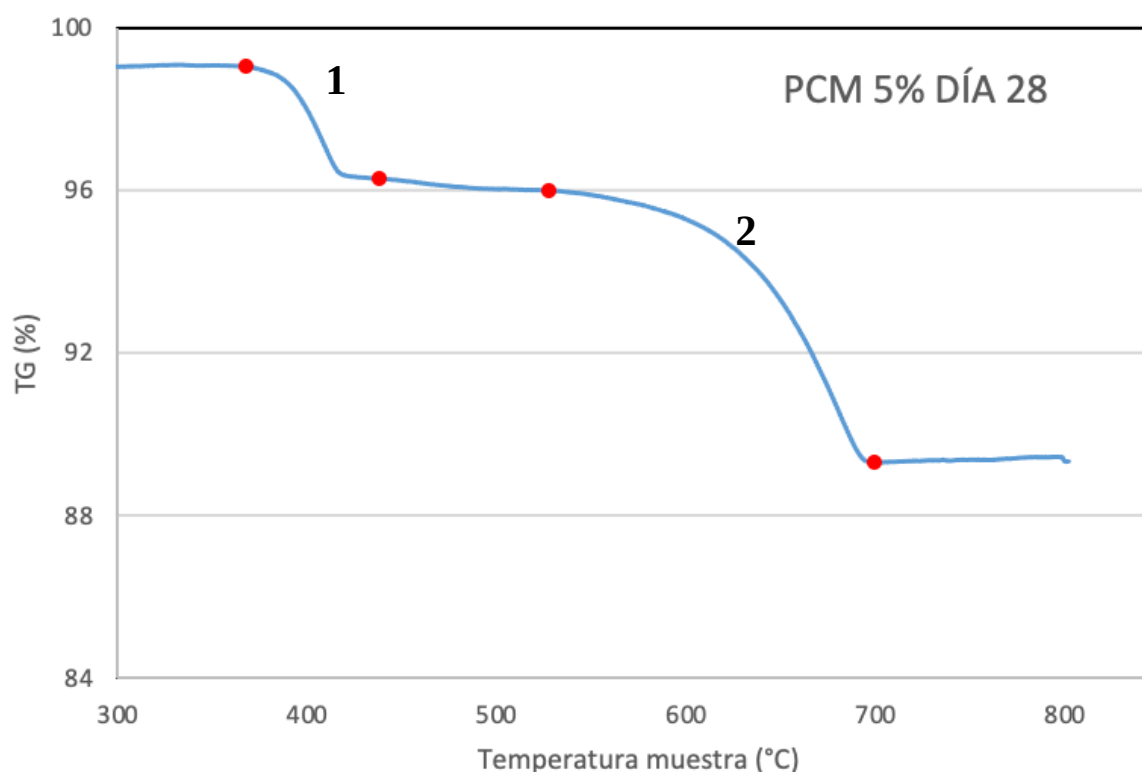


Figura 4-11 Resultado variación masa por análisis TG: muestra con 5% de PCM día 28.

MUESTRA	Peso inicial (mg)	Temperatura (°C)	Variación de masa (%)
5%PCM día 28			
1	13,3	373-425	2,62
2	13,3	541-700	6,68

Tabla 4-8 Resultados variación de masa de la muestra con 5% de PCM a los 28 días de curado.

En la Figura 4-12 se muestra el resultado del análisis termogravimétrico de la muestra con una proporción de 10% de PCM a los 28 días de curado. En la Tabla 4-9 se muestran los resultados de las dos principales variaciones de masa. Se observa que en la primera variación se produce una variación de masa de un 2,24% en el intervalo entre 390-415°C siendo ligeramente superior a la pérdida de masa producida en la segunda variación. Está causada por la pérdida de agua de gel del silicato de calcio hidratado y en menor medida de los aluminatos y sulfo-aluminatos. En la segunda variación se observa una variación de 1,61% de masa entre los 567-670°C, posiblemente producida por la descomposición del carbonato.

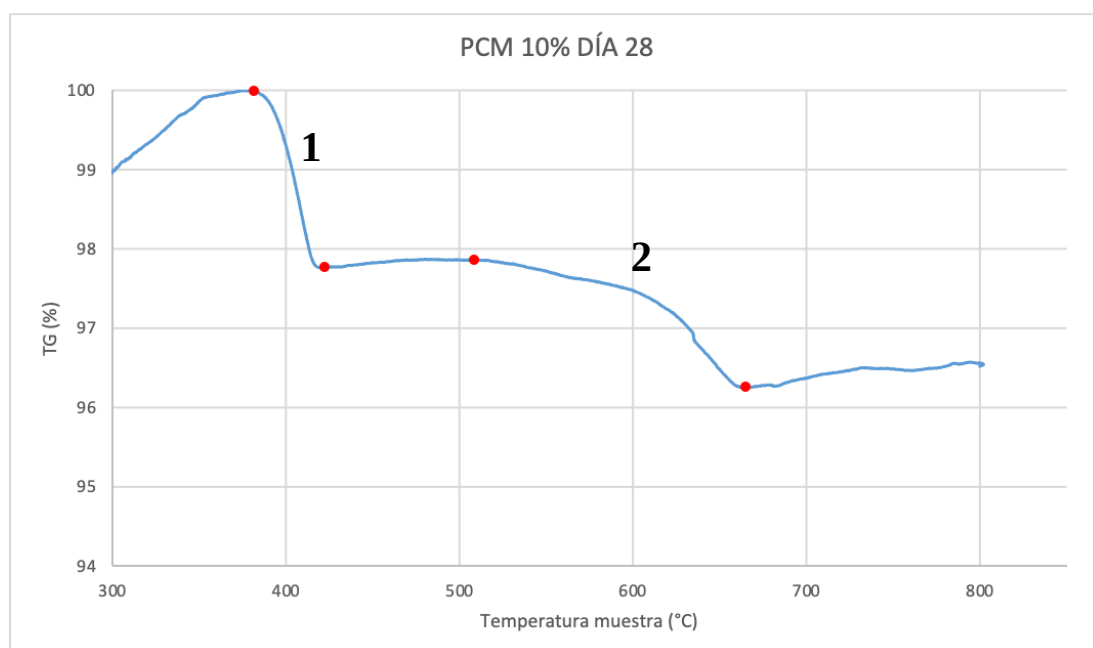


Figura 4-12 Resultado variación masa por análisis TG: muestra con 10% de PCM, día 28.

MUESTRA	Peso inicial (mg)	Temperatura (°C)	Variación de masa (%)
10%PCM día 28			
1	12,5	390-415	2,24
2	12,5	565-670	1,61

Tabla 4-9 Resultados variación de masa de la muestra con 10% de PCM a los 28 días de curado.

Además de analizar la carbonatación mediante análisis termogravimétrico, se ha comprobado el grado de carbonatación mediante el uso de fenolftaleínas, por la rapidez de los resultados, en dos periodos de tiempo, a los doce y veintiocho días de curado. En la Figura 4-13 se observa como el grado de carbonatación es mínimo como resultado de su color rojizo alcanzando aproximadamente un pH de 9, teniendo una profundidad de carbonatación de 1 mm tras doce días de curado. Las muestras se encuentran sin carbonatar casi en su totalidad.



Figura 4-13 Muestras de mortero tras aplicar fenolftaleína (a la izquierda muestra de 10% de PCM, en el centro muestra de 5% de PCM y a la izquierda muestra de referencia).

En cambio, transcurridos 28 días se observa que la profundidad de carbonatación es mucho mayor siendo de casi 1cm como se puede ver en la Figura 4-14, siendo la parte del núcleo de las tres muestras la que muestra por su color rojizo que no están carbonatadas las muestras en su totalidad.

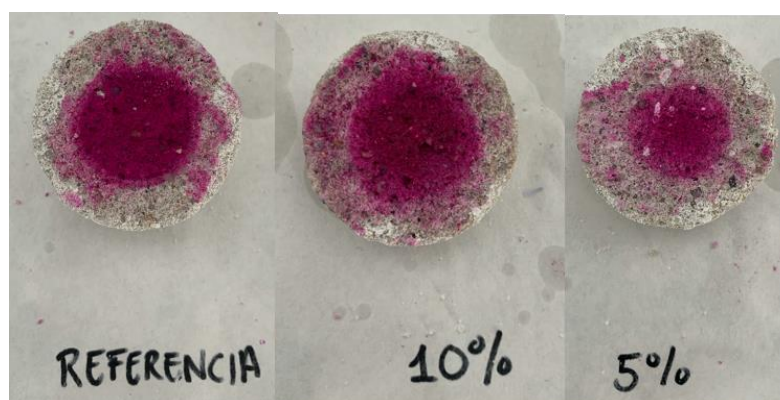


Figura 4-14 Muestras de mortero tras aplicar fenolftaleína a los 28 días de curado.

4.2 Caracterización de los morteros de cal

A continuación, se muestran los datos obtenidos durante la caracterización de los sistemas porosos de los morteros de cal utilizados en el presente trabajo de fin de grado y que vienen recogidos en la siguiente Tabla 4-10 :

Propiedades	Referencia	PCM 5%	PCM 10%
Porosidad accesible al agua (%)	19,70 ± 0,56	22,99 ± 2,26	21,98± 1,16
Porosidad accesible al Hg (%)	26,81	30,20	20,27
Porosidad capilar (%)	18,00 ± 4,24	18,25 ± 4,60	15,75 ± 4,60
Tortuosidad	1,81	1,49	3,10
Densidad aparente	1731,79 ± 24,82	1807,51 ± 68,48	1844,43 ± 40,63
Coefficiente capilar	0,237 ± 0,015	0,207 ± 0,021	0,2034 ± 0,011
Ultrasonidos (m/s)	1228,38	1115,36	1355,43
Anisotropía (dM)	1,88	5,57	4,92
Anisotropía (dm)	3,55	3,92	7,73

Tabla 4-10 Principales parámetros obtenidos durante los ensayos para caracterizar los morteros de cal.

4.2.1 Estructura porosa: porosidades accesibles, capilaridad y tortuosidad.

A partir de los parámetros mostrados en la Tabla 4-10 obtenidos del ensayo de porosidad accesible al agua, se puede apreciar que en general la adición de PCM permitió incrementar la porosidad accesible del mortero, alcanzándose mayores valores en las muestras de PCM 5%. Sin embargo, los resultados obtenidos parecen indicar que si la adicción es muy alta, en este caso de un 10% en peso, se puede llegar a ocasionar una disminución de la porosidad, llegándose a obtener en algunos casos porosidades inferiores a las obtenidas en muestras de referencia (llegando a disminuir hasta un 10% la porosidad), lo que indica seguramente que parte del PCM añadido comienza a llenar parte del sistema poroso del material.

Analizando la porosidad accesible al mercurio se puede observar que esta es superior en todos los casos a excepción del mortero con 10% de PCM, a la porosidad accesible al agua. Esta mayor porosidad indica que tanto los morteros de referencia como los de 5% de PCM deben contener un volumen de

poros que se encuentra por debajo de aquellos que son accesibles al agua (poros con tamaño de acceso inferior a $0,1\mu\text{m}$). En el caso del mortero de 10% de PCM, el menor valor de mercurio parece indicar que este mortero carece de esta familia de poros.

Comparando los tres morteros se aprecia que el mortero que muestra mayor porosidad accesible al mercurio es el mortero de 5% de PCM, seguido del de Referencia y en menor medida el mortero de 10% de PCM. Estos valores de porosidad estarían relacionados con los grados de carbonatación que se determinaron anteriormente y también se puede relacionar con la porosidad: a mayor porosidad, mayor cantidad de CO_2 puede penetrar en el interior de los poros del mortero y por tanto mayor será el grado de carbonatación [60].

Con respecto a la distribución porosimétrica, se aprecia que en los tres casos los morteros analizados presentan una distribución bimodal. Los morteros de referencia y con un 5% de PCM presentan una familia de poros entre $0,1-5\mu\text{m}$, con un pico centrado en $1\mu\text{m}$ y otra entre $9-90\mu\text{m}$ con un pico centrado en $10\mu\text{m}$. Mientras que en el mortero con 10% de PCM la primera de las familias va desde $1-5\mu\text{m}$, careciendo en este caso de un volumen poroso por debajo de $0,1\mu\text{m}$ (este hecho coincide con lo comentado anteriormente cuando se analizó la diferencia entre la porosidad accesible al agua y al mercurio de cada mortero).

Analizando cada mortero por separado se aprecia que:

- En el mortero de referencia (con un volumen total introducido de $0,135\text{ mL/g}$), el 91% de los poros caen dentro del rango de poros con tamaño de acceso capilar entre $0,1-100\mu\text{m}$ (lo que se corresponde con un volumen total introducido de $0,135\text{ mL/g}$). Un pequeño porcentaje, 2,79%, se corresponde con poros con tamaño de acceso inferior a $0,1\mu\text{m}$. Mientras que el 6,21% restante se corresponde con poros con tamaño de acceso superior a $100\mu\text{m}$.
- En el mortero de PCM5% (con un volumen total introducido de $0,1739\text{ mL/g}$), el 94,49% de los poros presentes en la muestra se encuentran dentro del rango de poros con tamaño de acceso capilar entre $0,1-100\mu\text{m}$, correspondiente a $0,169\text{ mL/g}$ de mercurio (este contenido de poros es superior al del mortero de referencia, sobre todo si analizamos el rango entre $0,1-5\mu\text{m}$, lo cual indicaría que este mortero presenta una capacidad de succión capilar superior al de referencia). En este caso, en este mortero únicamente un 2,44% de los poros presenta un tamaño inferior a $0,1\mu\text{m}$, mientras que sólo el 3,07% son poros con diámetro de acceso grande superior a $100\mu\text{m}$, siendo este porcentaje la mitad que el de la muestra de referencia. Esta reducción en los poros grandes puede ser debido a que estos han sido parcialmente rellenados por las partículas de PCM lo que explicaría el mayor volumen de poros en otros tamaños (por ejemplo: en $1\mu\text{m}$ y en $10\mu\text{m}$).
- En el caso mortero con un 10% de PCM (con un volumen total introducido de $0,0874\text{ mL/g}$), el volumen de poros con tamaño de acceso capilar es de un 93,78%, correspondiente en este mortero a un volumen total introducido de $0,082\text{ mL/g}$. A pesar de que en este mortero el peso porcentual de los poros con tamaño de acceso capilar es superior al del mortero de referencia, se aprecia que el volumen de mercurio introducido en este rango de poros es menor, lo que indica que este mortero debe tener una menor capacidad de succión capilar que el mortero de referencia. En este mortero el 6,22% de los poros presentan un tamaño superior a $100\mu\text{m}$. En este caso el mortero carece de poros con tamaño de acceso inferior a $0,1\mu\text{m}$. Esta desaparición en la familia de poros puede estar relacionada con la oclusión de estos poros por parte del PCM incorporado.

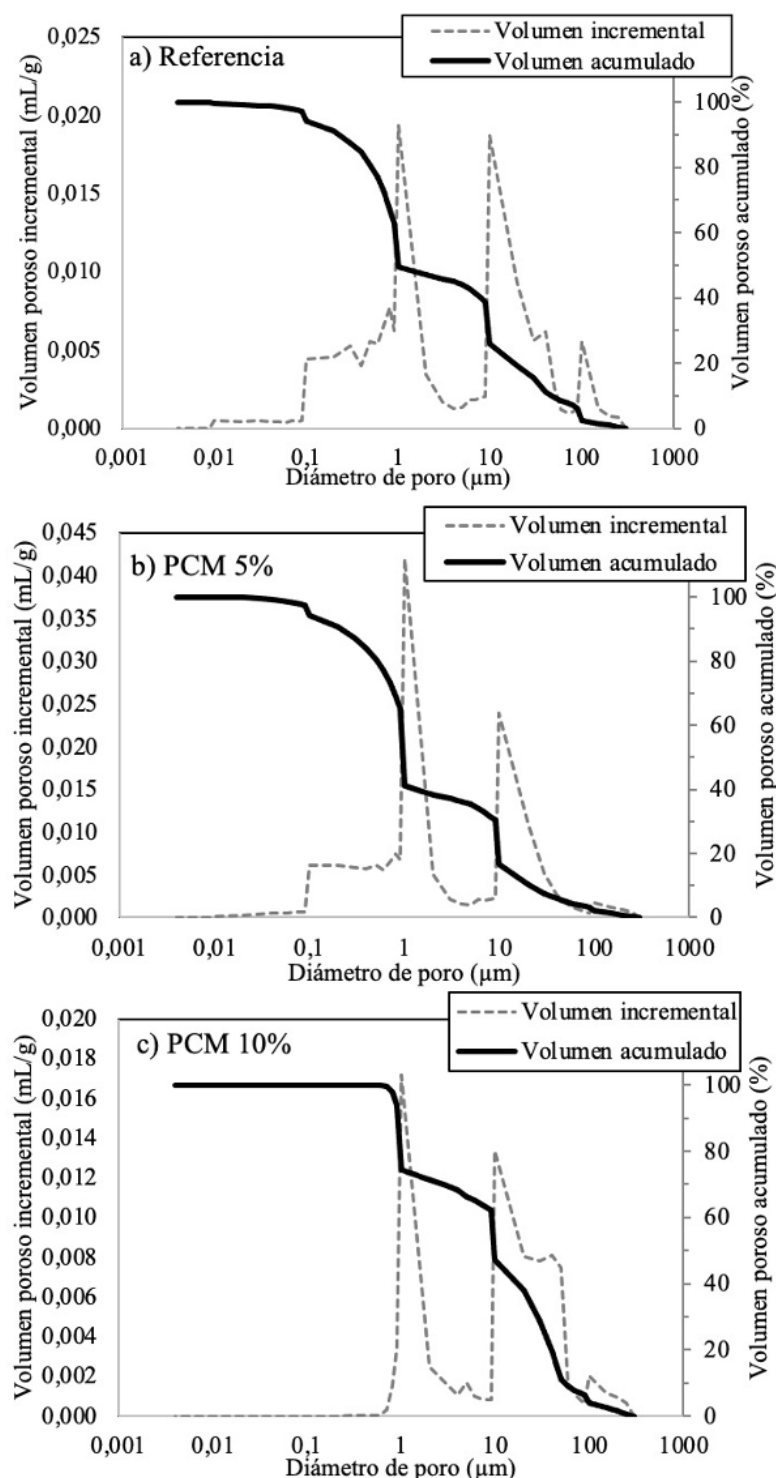


Figura 4-15 Distribución porosimétrica obtenida mediante ensayo de porosimetría de inyección de mercurio (Hg) de la muestra a) referencia, b) PCM 5% y c) PCM 10%.

En la Figura 4-16 se muestra comparativamente las tres distribuciones porosimétricas de los tres morteros analizados, donde se puede observar mucho mejor la diferencia existente entre ellos, en lo que respecta a las distintas familias de poros existentes y al volumen poroso correspondiente a cada familia. A grandes rasgos y resumiendo lo comentado anteriormente, se aprecia como el mortero PCM10% carece de poros con tamaño de acceso inferior a 0,1 μm y como el mortero PCM5% presenta un mayor volumen poroso, sobre todo en la zona correspondiente a 1 μm con un pico máximo muy pronunciado

que destaca sobre el resto, siendo una posible causa de esta porosidad el mayor contenido de agua con el que se preparó este mortero, como se puede ver en la Tabla 3-2.

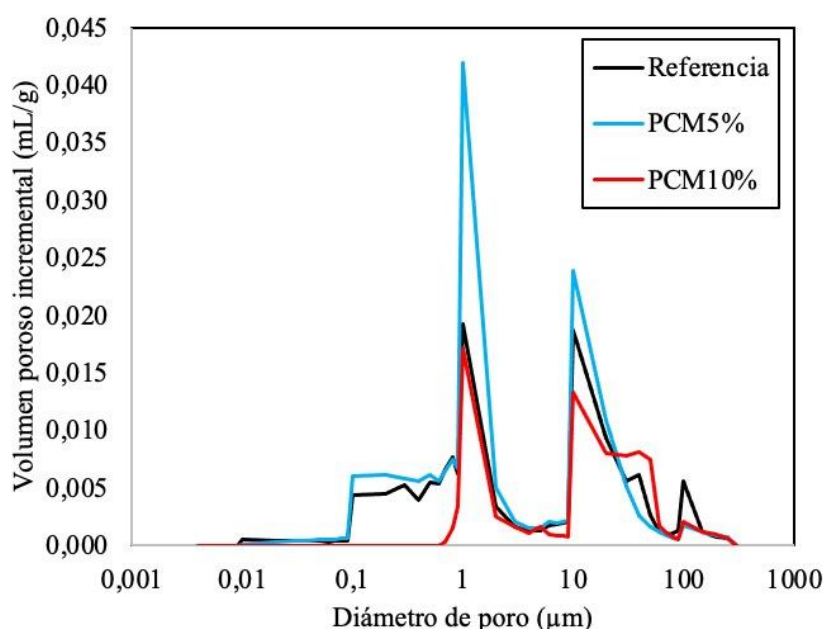


Figura 4-16 Gráficas superpuestas de volumen poroso incremental respecto al tamaño de los poros.

Todos estos resultados concuerdan con los relativos a la porosidad capilar obtenida (Tabla 4-10). Los resultados obtenidos demuestran que aquellos morteros con un mayor volumen poroso en el rango de poros con tamaño de acceso entre $0,1-100 \mu\text{m}$, como es el caso de los morteros de 5% de PCM, son los que presentan una mayor porosidad capilar, mientras que los que presentan un menor volumen poroso en ese rango son los que menor porosidad capilar presentan (morteros 10% de PCM).

Con respecto a la tortuosidad, el material con mayor tortuosidad es el mortero 10% de PCM seguido por el de referencia, aunque ya muy distanciado. Cuanto mayor es la tortuosidad, mayor retención de agua se producirá en el interior de la muestra y más lento será el proceso de desorción, lo que ocasionará que en el material permanezca un mayor contenido de humedad residual. Este hecho ha motivado que diversos autores han constatado que una tortuosidad elevada ocasiona una menor durabilidad en un material de construcción frente a la acción de agentes externos como el agua o las sales solubles [53].

Cinéticas de absorción por inmersión y capilaridad.

Los resultados obtenidos del ensayo de absorción muestran la cantidad de agua absorbida durante el proceso de inmersión. En la Figura 4-17 se representa la cantidad de agua que ha sido absorbida por cada una de las muestras en función del tiempo, pudiendo observar que la muestra de 5% de PCM es la que mayor cantidad de agua ha absorbido, mientras que el de 10% de PCM el que menos. Este resultado está relacionado con la porosidad accesible que tiene este mortero (Tabla 4-10) y con el tamaño de poros grandes; a mayor porosidad accesible al agua mayor volumen poroso y cuanto mayor sea la porosidad accesible al agua, en comparación con la accesible al mercurio, mayor será el contenido de poros con tamaño de acceso superiores a las $360 \mu\text{m}$ (rango máximo de medición del porosímetro). Por tanto, será la altura de la curva de absorción, ya que esta parte se corresponde con el llenado de poros grandes.

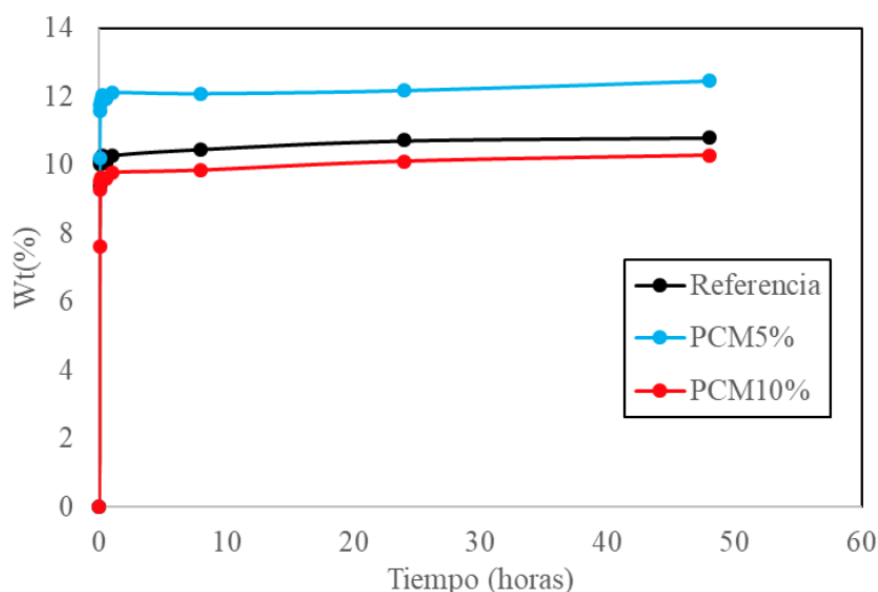


Figura 4-17 Curva de absorción de agua de las tres muestras analizadas representadas en función del contenido de agua absorbida (Wt) frente al tiempo en horas.

El proceso de desorción se mide la capacidad de secado del mortero de cal con diferentes proporciones de material de cambio de fase. Este ensayo muestra que el mortero de 5% de PCM es el que pierde un mayor contenido de agua y lo hace más rápido que el resto de morteros, lo que indica que los poros están mucho mejor conectados entre sí y con el exterior.

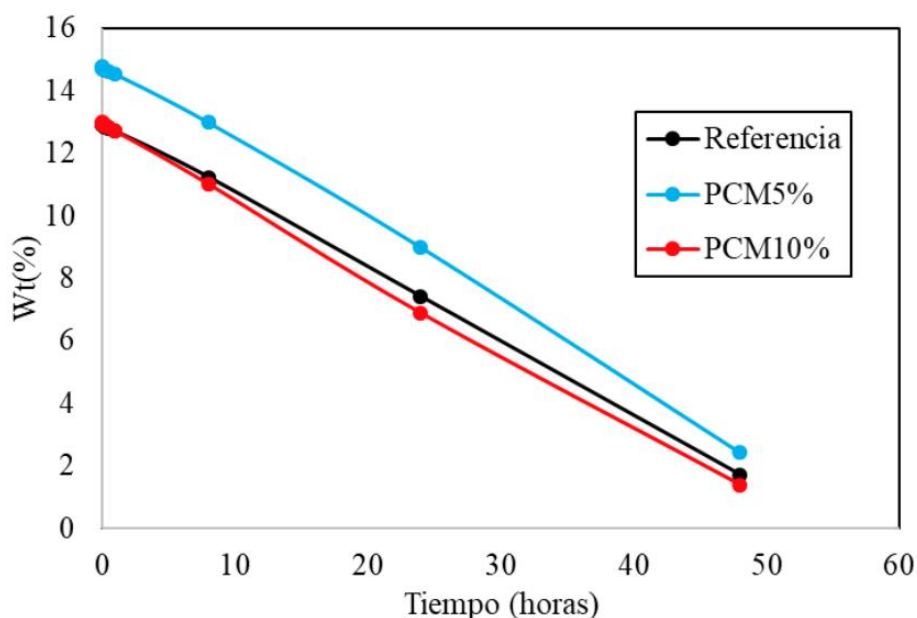


Figura 4-18 Curva de desorción de agua de las tres muestras analizadas representadas en función del contenido de agua absorbida (Wt) frente al tiempo en horas.

Durante estos ensayos se aprecia como en los primeros instantes de tiempo se produce la mayor absorción de agua por parte del mortero, estabilizándose a partir de la primera hora, siendo en este mismo periodo la mayoría del porcentaje de agua absorbido del ensayo completo. A partir del segundo tramo de la curva, la cantidad de agua que continúan absorbiendo las muestras es pequeña. La masa constante por saturación se logra aproximadamente al séptimo del comienzo del ensayo.

En la Tabla 4-11 se observa como han evolucionado las muestras según el grado de saturación en función del tiempo, reflejándose una vez más lo anteriormente visto: la muestra con un 5% de PCM es la que absorbe agua más rápido, alcanzando un grado de absorción similar al que alcanzaría la muestra a vacío lo que demuestra la conectividad entre los poros. La primera muestra en saturarse es la de 10% de PCM. Este último resultado posiblemente está relacionado con la porosidad accesible al agua, ya que la muestra tiene la porosidad accesible al agua de menor valor (destacar que el valor de la porosidad accesible al agua de la muestra de 10% es ligeramente superior a la de referencia, pero tiene una desviación mayor de los resultados obtenidos).

	Tiempo	Referencia	PCM5%	PCM10%
W_s (%)		11,38±0,16	12,73±0,59	11,93±0,89
W_t (%)	1 hora	10,281±0,21	12,12±0,17	9,76±0,06
	1 día	10,71±0,28	12,26±0,04	10,97±0,08
	3 días	11,23±0,339	12,83±0,18	10,88±0,28

Tabla 4-11 Contenido de agua en saturación (W_s en %) y grado de saturación por inmersión en función del tiempo (W_t , en %).

El mayor grado de saturación ha sido alcanzado por la muestra de 5% de PCM durante la absorción con lo que podemos afirmar que presenta una mayor interconexión entre sus poros con respecto a las otras dos muestras.

Desde el punto de vista de la durabilidad, los morteros deben tener un proceso de desorción rápido y fácil, ya que la expulsión de agua y humedad hacia el exterior permite evitar posibles alteraciones físico-químicas.

La tortuosidad está relacionada con el proceso de absorción y desorción del mortero, por lo que cuando mayor sea la tortuosidad de la red porosa menor es el grado de saturación en inmersión para un mismo intervalo.

Durante el ensayo de porosidad capilar se puede distinguir dos etapas diferentes, la primera en la que se produce la entrada del agua en contacto con el material poroso a través de los poros más pequeños que rellenar a su vez a los de mayor diámetro y expulsión del aire desde los poros al exterior, siendo mucho más rápida en los primeros instante de tiempo y la segunda etapa en la que se encuentra la muestra del mortero tras llegar al punto de saturación siendo la entrada de agua cada vez más lenta (corresponde con el tramo de la curva horizontal como se puede apreciar en la Figura 4-19).

En el análisis de las gráficas se puede obtener el coeficiente de absorción capilar (C) a partir de la primera parte de la curva. Este valor se corresponde con la pendiente de la etapa capilar que permite relacionar la succión capilar del mortero con la porosidad abierta, proporcionando información sobre la porosidad y la alteración que puede sufrir frente al deterioro. Por lo que, un valor bajo de C se puede relacionar con un radio de acceso pequeño, con geometría irregular y con una tortuosidad alta provocando efectos negativos sobre el material poroso pudiendo afectar a la durabilidad de un material [50].

A partir de la segunda parte de la curva de la gráfica se obtiene la porosidad capilar. Para ello hay que tener en cuenta la masa de agua total que absorbe la roca por capilaridad (M_s), la densidad del agua (ρ) y el volumen de la probeta.

En la Figura 4-19, se puede ver que la muestra de 5% de PCM es la que mayor capacidad de absorción capilar y mayor velocidad de absorción (Tabla 4-11). Por el contrario, el que menor absorción y a menor velocidad es el mortero de 10% de PCM. Ambos resultados concuerdan con lo analizado anteriormente al analizar la distribución porosimétrica de los distintos morteros.

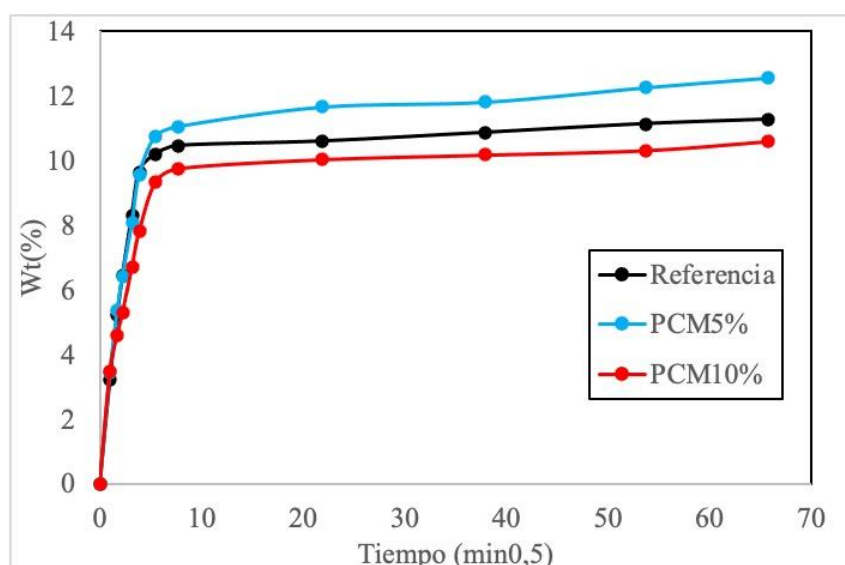


Figura 4-19 Grado de saturación (W_t) respecto al tiempo ($\text{min}^{0,5}$) de las muestras de referencia, 10% de PCM y 5% de PCM.

Propiedades	Tiempo	Referencia	PCM5%	PCM10%
W_s (%)		11,38±0,16	12,73±0,59	11,93±0,89
W_t (%)	1 hora	10,46±0,06	11,06±0,26	9,76±0,06
	1 día	10,85±0,26	11,81±0,04	10,18±0,26
	3 días	11,27±0,47	12,55±0,24	10,60±0,06

Tabla 4-12 Contenido de agua en saturación (W_s , en %) y grado de saturación (W_t , en %) por capilaridad en función del tiempo.

Durante el ensayo de ultrasonidos se aprecia que la muestra la muestra con mayor velocidad media analizada en las tres direcciones (eje x, y, z) es la muestra con un 10% de PCM. Este valor está relacionado con la porosidad, en la cual dicha muestra tiene el valor más bajo de las tres. Por lo que se puede afirmar que la muestra tiene la mayor cohesión interna de las muestras analizadas. En cambio, los materiales que muestran velocidades más bajas son los que se corresponden con materiales deteriorados, en las que si la porosidad aumenta se disminuye la velocidad de forma exponencial. Por ello, tras comparar los datos obtenidos la muestra que ha obtenido la velocidad media más baja ha sido la muestra con un 5% de PCM, debido a su alta porosidad accesible que muestra. Cabe destacar que las relaciones con la porosidad se realizan con respecto a la del mercurio ya que tanto la precisión como la desviación de los valores son más exactos.

La Figura 4-20 muestra los valores promedio de los valores anisotropía relativa(dm) y total (dM), así como valores de velocidad (velocidad media en cada dirección, velocidades medias totales). A la hora de analizar qué muestras tienen una mayor anisotropía nos basaremos en la siguiente fórmula para hacer la comparativa [61]:

$$dMm = dM + dm$$

Los resultados obtenidos de anisotropía de las probetas analizadas nos muestran como la de referencia presenta la menor anisotropía relativa y total, siendo el material que se puede considerar con mayor homogeneidad tras ser analizado en las tres direcciones (x, y, z) reduciendo de esta forma uno de los principales defectos estructurales y dando mayor fiabilidad al material. En cambio, la muestra con un 10% de PCM presenta el valor más alto de la anisotropía. Cabe destacar que la muestra de 5%.de

PCM presenta la anisotropía total más alta. Este tipo de análisis se realiza a nivel tridimensional por lo que influirá en el nivel hídrico del comportamiento de los materiales y en el proceso de descomposición, por lo que la muestra de referencia será la que aporte mejores propiedades a nivel composicional y mecánico.

La durabilidad de los morteros está influenciada por el grado de anisotropía, ya que es determinante a la valorar la calidad y resistencia que presenta frente a la descomposición y otros agentes atmosféricos. Por ello, la muestra de referencia que es la que menor anisotropía presenta posiblemente ofrezca una mayor durabilidad.

Muestra		PC5-1								
Dirección	nº	d (mm)	t (µs)	v (m/s)	vd med	v med	StD	StD	dM	dm
x	1	46,17	35,40	1304,24	1158,71	1115,36	176,40	119,58	5,57	3,92
	2	46,49	48,30	962,53						
	3	46,44	38,40	1209,38						
y	1	47,49	46,10	1030,15	1073,16		121,61			
	2	48,26	49,30	978,90						
	3	47,57	39,30	1210,43						
z	1	45,88	41,10	1116,30	1114,20		76,15			
	2	45,94	44,30	1037,02						
	3	45,43	38,20	1189,27						

Muestra		PC10								
Dirección	nº	d (mm)	t (µs)	v (m/s)	vd med	v med	StD	StD	dM	dm
x	1	47,30	29,60	1597,97	1431,30	1355,43	157,07	99,42	4,92	7,73
	2	47,84	37,20	1286,02						
	3	46,95	33,30	1409,91						
y	1	47,98	35,40	1355,37	1324,75		28,33			
	2	48,99	37,70	1299,47						
	3	48,29	36,60	1319,40						
z	1	45,51	35,30	1289,24	1310,25		30,92			
	2	45,87	35,40	1295,76						
	3	45,89	34,10	1345,75						

Muestra		PCO-9								
Dirección	nº	d (mm)	t (µs)	v (m/s)	vd med	v med	StD	StD	dM	dm
x	1	47,05	34,70	1355,91	1258,04	1228,38	144,77	137,66	1,88	3,55
	2	47,60	43,60	1091,74						
	3	47,09	35,50	1326,48						
y	1	48,94	40,50	1208,40	1212,90		132,31			
	2	49,38	45,60	1082,89						
	3	49,18	36,50	1347,40						
z	1	47,63	38,20	1246,86	1214,19		188,03			
	2	47,36	46,80	1011,97						
	3	45,94	33,20	1383,73						

Figura 4-20 Resumen resultados de ensayo de ultrasonidos y anisotropía.

Los resultados del SEM-EDS no han sido recibidos a tiempo debido a la situación actual de COVID-19 y al volumen de trabajo del servicio de microscopía electrónica del Centro de Apoyo Científico Tecnológico a la Investigación de la Universidad de Vigo (CACTI) y se espera que estén a tiempo para mostrarlos en la defensa del TFG.

4.3 Propiedades mecánicas

Los resultados obtenidos de los diferentes ensayos para la caracterización de las propiedades mecánicas se muestran resumidos en la Tabla 4-13:

Propiedades cubo	Referencia	PCM 5%	PCM 10%
Dureza superficial (HLD)	201,46±1,90	203,91±3,98	201,05±2,76
RCS (porosidad Hg)	9,51	8,44	12,24
RCS (porosidad Agua)	12,55	11,77	12,05
Propiedades cilindros	Referencia	PCM 5%	PCM 10%
Dureza superficial (HLD)	220,61±9,94	197,36±0,78	200±0,65
RCS (con porosidad Hg)	13,87±0,68	11,35±0,04	11,98±0,03

Tabla 4-13 Parámetros principales de las propiedades mecánicas.

4.3.1 Resultados de los ensayos de dureza superficial por impacto

Durante el ensayo de dureza superficial se han analizado las muestras cilíndricas y cúbicas con la finalidad de comparar ambos resultados. Los datos comparados presentan similitudes entre ambos morteros exceptuando el de referencia cuyos valores de dureza superficial analizados en el cilindro obtuvieron una alta desviación.

Analizando los resultados de los morteros, la muestra con un 5% de PCM es la que presenta mayor dureza superficial, aunque la desviación es muy alta pudiendo aproximarse al valor de la muestra de referencia. La muestra con un 10% de PCM ha sido la que ha presentado menor dureza superficial durante el ensayo en las muestras cúbicas. En cambio, en el ensayo con muestras cilíndricas se trata de la segunda muestra con mayor dureza, siendo correlacionado este análisis con el valor de la dureza a compresión.

4.3.2 Resultados ensayo a compresión uniaxial

El objetivo del ensayo de compresión uniaxial fue determinar como afectaba a la resistencia a compresión la incorporación de materiales de cambio de fase y la proporción utilizada para la realización de las diferentes muestras a analizar. Para ello se comprobará realizando cuatro ensayos por cada tipo de probeta cilíndrica utilizando el equipo de compresión manual WP 300.

Al inicio del ensayo se observó que no todas las bases de los cilindros son completamente lisas lo que produjo que la distribución de fuerzas aplicada por la placa de presión sobre las bases no fuese uniforme, provocando una rotura prematura no deseada. Dando lugar a no llegar a la carga máxima que soporta previa a la rotura. Por ello, se optó por la colocación de neopreno en ambas bases del cilindro.

Los valores obtenidos durante el ensayo a compresión uniaxial han sido desestimados por su baja fiabilidad por varios factores:

1. El primero, los valores obtenidos durante el citado ensayo deberían tener una correlación con los resultados obtenidos del ensayo de dureza superficial utilizando la ecuación de Aoki y Matsukura, siendo los obtenidos en el presente muy inferiores.
2. En estudios similares de morteros con incorporación de materiales de cambio de fase, el rango de valores de resistencia a compresión oscila entre los 7 y 50 MPa, siendo los obtenidos en este ensayo inferiores a 1Mpa. En cambio, los valores resultantes del punto 1 y reflejados en la Tabla 4-13 se encuentran comprendidos entre el intervalo de dureza de estudios similares [37] [46].
3. Posible fallo del dinamómetro del equipo de compresión WP 300 en la lectura de datos, ya que se trata de un equipo manual.

Por estas razones, se ha decidido desestimar los datos obtenidos en el ensayo de compresión uniaxial siendo utilizado para comprobar visualmente la satisfacción de rotura de las muestras según normativa como se verá en el desarrollo de este apartado.

Durante el ensayo se observó que la mayoría de las roturas según la norma UNE-EN 12390-3 :2020 eran no satisfactorias. Como se puede observar en la Figura 4-21 de los ensayos hechos a las muestras de 10%, ninguna fue satisfactoria, de lo que se puede deducir por las imágenes y basándose en la prueba realizada de fenolftaleína tras 28 días, que los núcleos de las muestras no estaban carbonatados. Por ello, se puede afirmar que las muestras de mayor tamaño como la analizadas durante este ensayo (cilíndricas de 5,3x 13cm) no obtuvieron la resistencia máxima que deberían. Además, se observa que una de las principales zonas de rotura es la base que estuvo apoyada durante el tiempo de curado, siendo la base menos lisa y la que se ha visto más afectada por el ensayo de compresión.



Figura 4-21 Roturas no satisfactorias de muestras con un 10% de PCM.

A partir de los resultados obtenidos de dureza superficial se puede obtener algunas de las principales propiedades mecánicas, como la compresión uniaxial mediante la ecuación de Aoki y Matsukura [58]. Los valores obtenidos se han reflejado en la Tabla 4-13, en los que se ha reflejado la relación entre la dureza Leeb, porosidad del material (tanto la porosidad de agua como la del mercurio) y la resistencia a compresión uniaxial.

Los resultados obtenidos de la ecuación de Aoki y Matsukura han sido analizados mediante la porosidad accesible al agua . Con respecto al análisis de los resultados, se ha obtenido que la muestra de 10% de PCM presenta mayor dureza a compresión seguida de la muestra de referencia. En cambio, la muestra que ha obtenido la porosidad más alta presenta es la que menos resistencia tiene, siendo la

muestra de 5% de PCM. La relación de la porosidad con la resistencia de los materiales ha sido estudiada en diferentes líneas de investigación, en las que se ha concluido que en general cuanto mayor sea la porosidad de un material, menor resistencia presentará [62] [63].

En la Figura 4-22 se observan dos tipos de muestras diferentes (muestra de 5% de PCM y muestra de referencia), en las que también se obtuvieron resultados no satisfactorios. Se observa que las muestras rompen por la zona central quedando intactos los bordes de las muestras cilíndricas, los cuales presentaban una mayor carbonatación transcurridos los 28 días. Por otro lado, al analizar los resultados obtenidos del ensayo de dureza superficial donde el grado de carbonatación era mayor, con los valores obtenidos y relacionados con la ecuación de Aoki y Matsukura [58] se obtiene los valores de compresión uniaxial (Tabla 4-13).



Figura 4-22 Roturas no satisfactorias (a la izquierda rotura muestra de 5% de PCM y a la derecha muestra de referencia)

En la Figura 4-23 se representan los perfiles de perforación realizados mediante la realización del DRMS en tres muestras (una de referencia, la segunda con un 5% de PCM y la última con un 10%). Para ello se representa en la imagen la fuerza (N) empleada en perforar el orificio frente a la profundidad de perforación (mm):

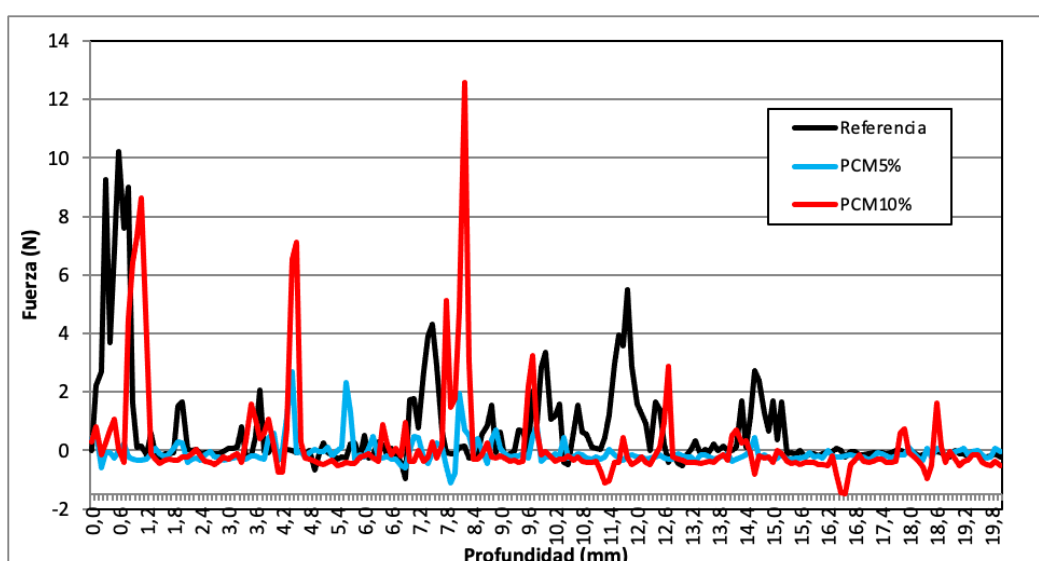


Figura 4-23 Gráfica de los perfiles de perforación. Condiciones de perforación: velocidad de rotación de 600 rpm y velocidad de avance de 10mm/min.

En la Figura 4-23 se observa que los perfiles de perforación de las muestras de 10% de PCM y la de referencia son muy similares. En cambio, el perfil de 5% de PCM la fuerza aplicada necesaria para penetrar por el orificio es muy baja debido a que la alta porosidad disminuye su resistencia. Con respecto a los picos producidos por las muestras de mayores perfiles, son producidos por el sílice, presentando una mayor resistencia a la perforación de la broca.

4.4 Resultados cámara termográfica

Durante el análisis termográfico se analizan los resultados de dos procesos diferentes, el primero en el que se aplica agua fría sobre la base de las muestras calentadas en la estufa y el segundo en el que se aplica agua caliente sobre las muestras enfriadas con el objetivo de comprobar el comportamiento de las muestras según su proporción de material de cambio de fase.

Ensayo calor-frío.

En el primer ensayo, se enfrió el agua hasta una temperatura de 1,7°C y las muestras fueron calentadas hasta los 40°C aproximadamente (como se puede observar en la Figura 4-24 en las que se muestra con las condiciones iniciales del primer ensayo).

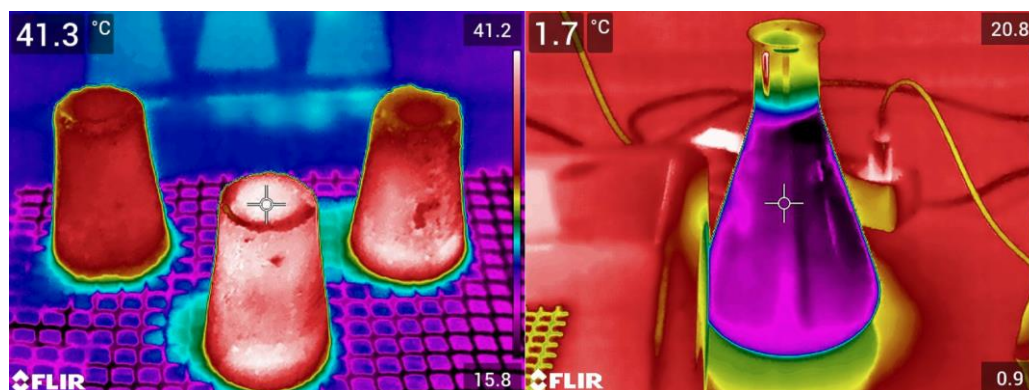


Figura 4-24 A la izquierda muestras calentadas en la estufa (izquierda muestra sin PCM, central muestra con 10% de PCM y en la derecha muestra con 5% de PCM). A la derecha agua enfriada a 1,7°C).

A medida que pasa el tiempo se observa que las muestras comienzan a reducir la temperatura a medida que las probetas van succionando el agua desde la base que se encuentra sumergida, siendo la muestra de 10% de PCM la que tiene mayor capacidad de retención de calor, seguida de la muestra de 5% de PCM. En cambio, la muestra de referencia pierde calor con facilidad.

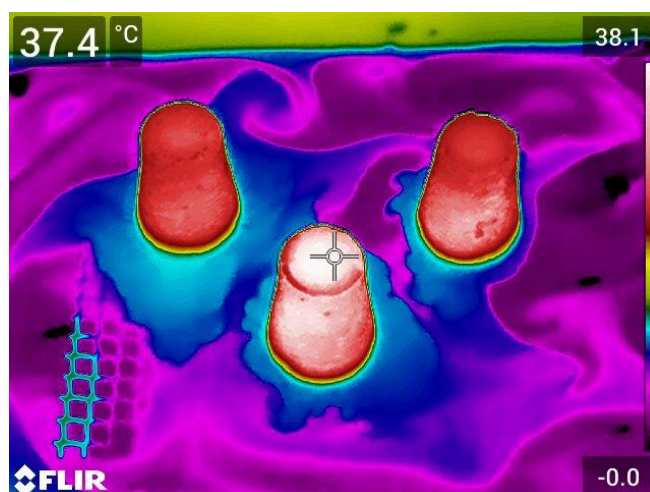


Figura 4-25 Muestras tras incorporar agua a 1,7°C cubriendo 3 mm sobre la base de la muestra.

En la Figura 4-26, se puede observar como desde el inicio del ensayo las muestras aún siendo calentadas en la misma temperatura se observa como la muestra con un 10% de PCM retuvo más calor y las muestras de 5% de PCM y la de referencia a pesar de partir de temperaturas iniciales similares, finalmente perdió mayor cantidad de calor siendo la temperatura final más baja de las tres.

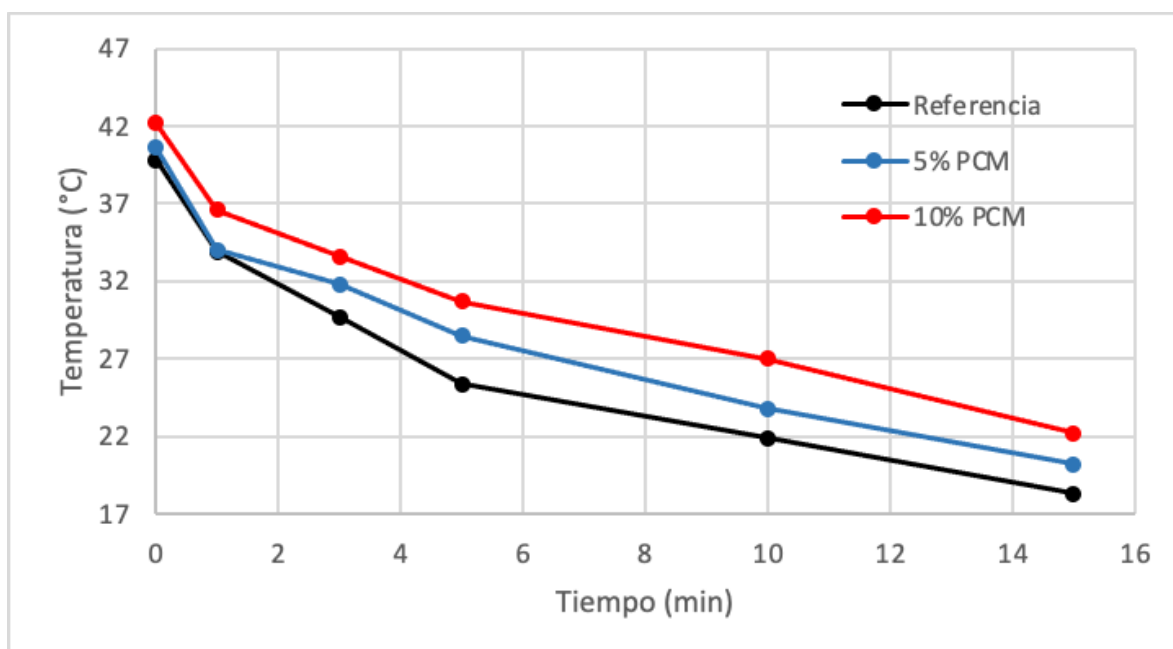


Figura 4-26 Representación de la variación de temperatura durante el ensayo calor-frío.

En la Tabla 4-14 se puede observar la evolución de las temperaturas durante los primeros quince minutos tras la aplicación del agua fría sobre la base de las tres muestras, ya que durante este periodo se dan las mayores variaciones de temperatura. Tras incorporar el agua fría y transcurrido un minuto, las tres muestras sufren una variación cercana las 6°C. A partir del tercer minuto se observa que la muestra de referencia es la que pierde mayor temperatura.

Tiempo (min)	Temperatura (°C) Referencia	Temperatura (°C) 5% PCM	Temperatura (°C) 10% PCM
Inicial	39,8	40,6	42,2
1	33,9	34	36,6
3	29,7	31,8	33,6
5	25,4	28,5	30,7
10	21,9	23,8	27
15	18,3	20,2	22,2

Tabla 4-14 Enfriamiento: evolución de la temperatura de las muestras tras incorporar el agua fría.

Finalmente, transcurrida una hora, se observa como la muestra de 10% de PCM ha tenido mayor capacidad de retención de calor respecto las otras dos muestras desde el principio del ensayo y la muestra de referencia ha alcanzado la temperatura ambiente (como se observa en la Figura 4-27). Esto demuestra que una mayor cantidad de PCM permite amortiguar en mayor medida los cambios bruscos de temperatura.

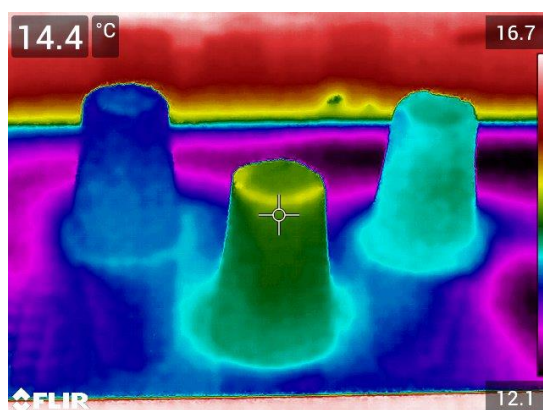


Figura 4-27 Ensayo calor-frío: a la izquierda muestra totalmente fría a temperatura ambiente, muestra central de 10% tras 1 hora aún mantiene calor y a la derecha muestra de 5% con temperatura por encima de ambiente.

Ensayo frío-calor.

En el segundo ensayo, se calentó agua hasta una temperatura cercana al punto de fusión del PCM y las muestras fueron refrigeradas a una temperatura aproximada de 5°C (Figura 4-28).

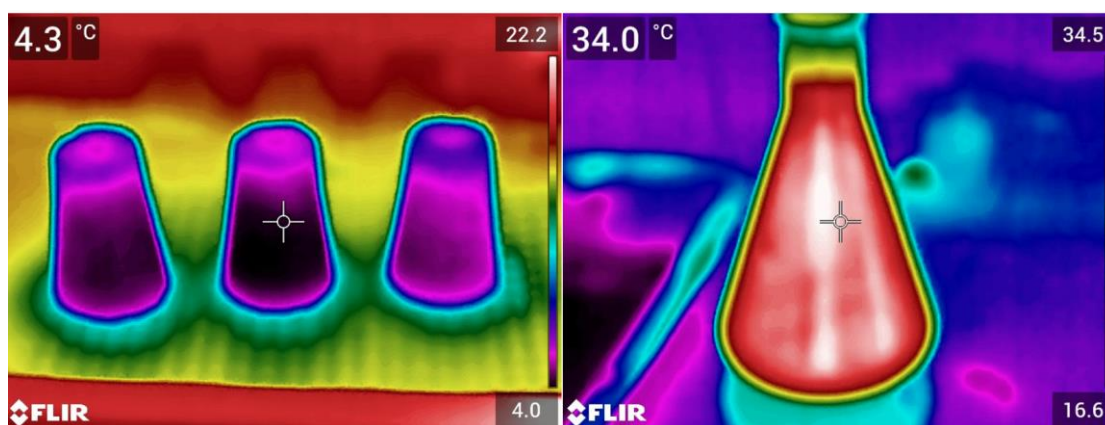


Figura 4-28 Ensayo frío-calor: a la izquierda muestras enfriadas a 4,3°C, a la derecha agua calentada a 34°C.

Durante los primeros minutos se observa en la Figura 4-29 como la muestra de referencia es la que mayor cantidad de calor comienza a absorber, variando las tonalidades de colores que se observar a través de la cámara FLIR. En cambio, la muestra con 10% de PCM, es la que mejor mantiene la baja temperatura.

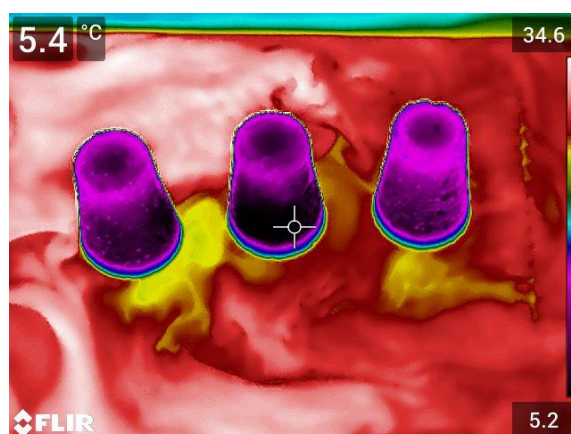


Figura 4-29 Ensayo frío-calor tras incorporar agua caliente (a la izquierda muestra de 5%, en el centro muestra de 10% y a la derecha muestra de referencia).

En la Figura 4-30 se observa como las muestras con PCM inicialmente tienen una temperatura menor. Tras incorporar el agua caliente se observa en la gráfica como la muestra de referencia (sin PCM) tiene menor capacidad de absorber calor del agua caliente. Esto se puede relacionar con los parámetros obtenidos de la porosidad accesible al agua de la Tabla 4-10, en la que muestra con mayor porcentaje de poros con tamaño mayor a $0,1\mu\text{m}$ coincide con la que tiene mayor capacidad de absorción de calor, siendo esta la muestra de 10% que tiene el 100% de los poros con un diámetro mayor, seguida de la muestra de 5% con un 97,56% y ligeramente inferior la muestra de referencia con un 97,2%.

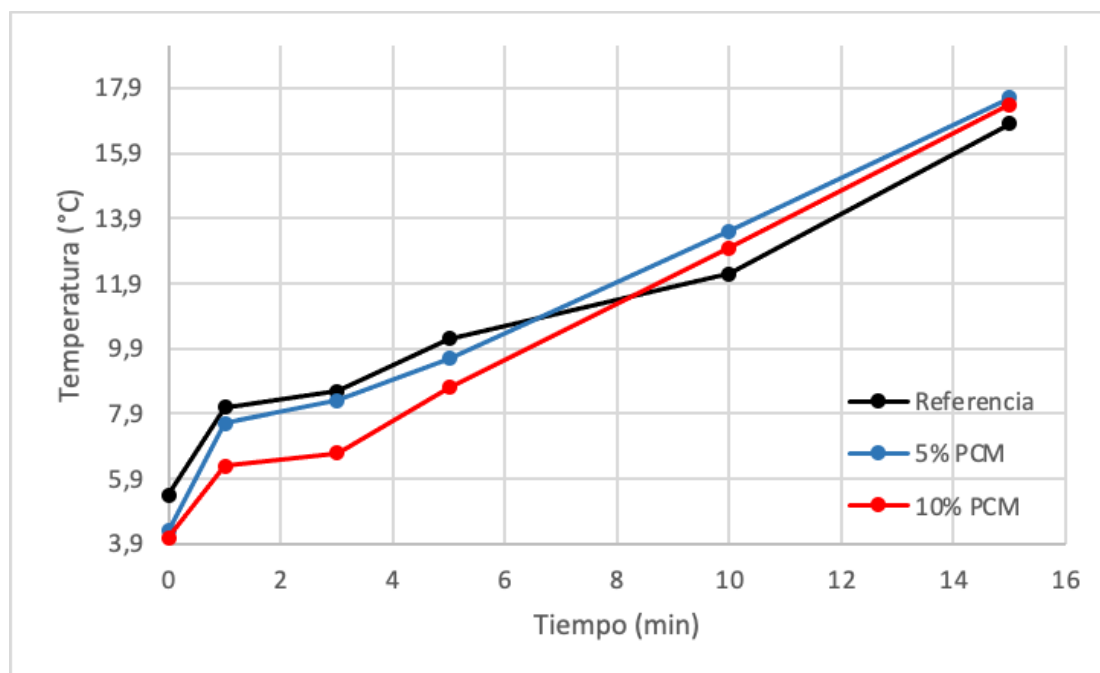


Figura 4-30 Representación de la variación de temperatura durante el ensayo de frío-calor.

En la Tabla 4-15 se puede observar la evolución de las temperaturas en los primeros quince minutos, no siendo tan significativa la diferencia de temperaturas finales transcurrido este tiempo como las observadas anteriormente en el ensayo de calor-frío.

Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Temperatura (°C)	Temperatura (°C)
	Referencia	5% PCM	10% PCM
Inicial	5,4	4,3	4,1
1	8,1	7,6	6,3
3	8,6	8,3	6,7
5	10,2	9,6	8,7
10	12,2	13,5	13,0
15	16,8	17,6	17,4

Tabla 4-15 Evolución temperatura ensayo frío-calor.

En la Figura 4-31 se puede observar la evolución de las temperaturas observadas visualmente mediante las diferentes tonalidades de colores que son mostradas por la cámara termográfica FLIR, siendo en este ensayo ligeramente diferentes.

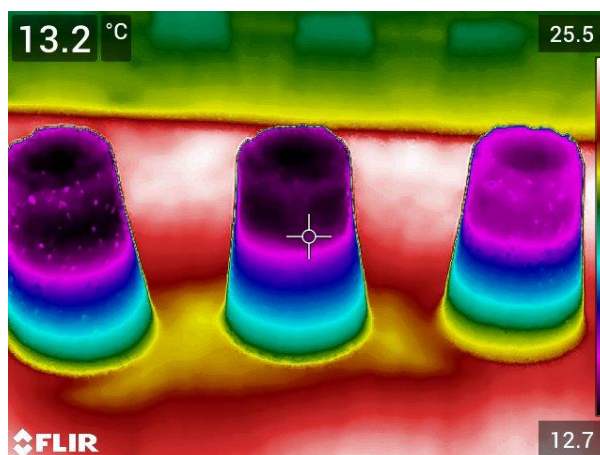


Figura 4-31 Transición durante la transmisión de calor del agua a las muestras enfriadas.

Temperatura ambiente

Para finalizar el estudio térmico mediante cámara termográfica se analiza cómo cada una de las muestras según su proporción de PCM tiene mayor calor en mismas condiciones atmosféricas de temperatura. Para ello se colocó las tres muestras a la intemperie durante varias horas. Posteriormente se analizó la temperatura con la cámara FLIR observando que la muestra de con una proporción de 10% de PCM retuvo un grado más que la referencia y la muestra con una proporción de 5% mantuvo la misma temperatura ambiental, sin perder ni ganar calor.

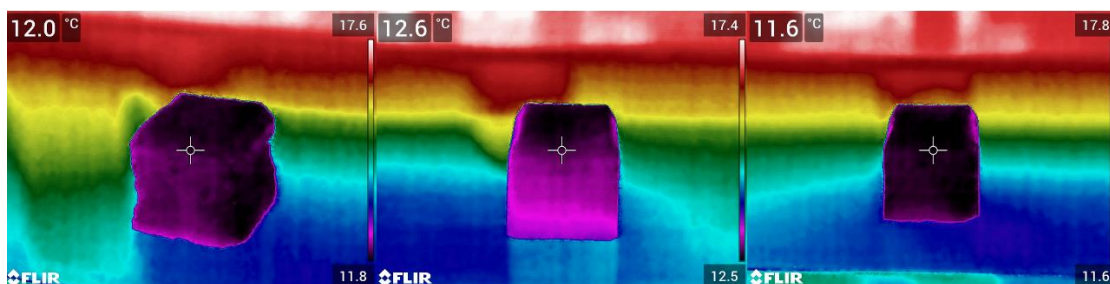


Figura 4-32 Muestras a temperatura ambiente (izquierda muestra con 5% de PCM, central muestra con 10% de PCM y derecha muestra sin PCM).

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos se muestran a continuación las principales conclusiones alcanzadas:

- Existe muy poca documentación en la que se evalué este PCM como material de cambio de fase para la incorporación en morteros de cal.
- A pesar de que los datos del TG no son concluyentes y se necesitarían más ensayos, la adición de PCM hasta una dosificación de un 5% permite incrementar la carbonatación del mortero, tal y como mostró el ensayo de la fenolftaleína.
- El PCM en una dosificación pequeña incrementa la porosidad del material, tanto la accesible como la capilar. Sin embargo, un porcentaje alto de PCM reduce estas propiedades al eliminar los poros de tamaño nanométrico.
- Los cambios afectados en la porosidad ocasionan cambios en las propiedades mecánicas. La reducción que ocasiona una mayor adición de PCM en la porosidad, hace que el mortero sea más masivo (reduce concentradores de tensiones, es decir poros) y aumenta la resistencia a compresión.
- La anisotropía del mortero aumenta cuanto mayor sea la cantidad de PCM incorporado, por lo que afecta a la durabilidad de forma negativa. Al igual que la tortuosidad, siendo el mortero más tortuoso cuanto mayor sea el porcentaje de material de cambio de fase afectando también al empeoramiento de la capacidad de desorción y por consiguiente de la durabilidad.
- La incorporación de PCM favorece la capacidad de almacenamiento de calor de las muestras según la proporción de material de cambio de fase incorporado. Cuanto mayor es la proporción de PCM incorporado al mortero, mayor es la capacidad de almacenamiento.

5.2 Líneas futuras

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en este trabajo, se proponen las siguientes líneas futuras de los materiales de cambio de fase:

- Desarrollo de nuevos estudios sobre la vida útil de los PCM, propiedad fundamental para su empleo en el sector de la construcción. Analizando el posible impacto medioambiental.
- Desarrollo de nuevos estudios combinando distintos PCM para una mayor optimización de sus propiedades en función de la aplicación deseada. Esto permitiría en el sector de la construcción la aplicación de PCM según el lugar de ubicación de la edificación y según los

diferentes climas seleccionando PCM con diferentes puntos de fusión en función de las temperaturas medias a lo largo del año.

- Desarrollo de unos estándares internacionales para distintas combinaciones de PCM disponibles y los distintos tipos de mortero y su relación con las propiedades físicas, químicas y térmicas.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] I. d. D. y. A. d. I. E. (IDAE), «Consumos del Sector Residencial en España».
- [2] C. Europea. [En línea]. Available: https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_es.
- [3] C. Europea, «Marco sobre clima y energía para 2030,» 2020.
- [4] ANFAPA, «Asociación Nacional de Fabricantes de Morteros Industriales y Sistemas de Aislamiento Térmico por el Exterior,» 2017.
- [5] P. Arce, C. Castellón, A. Castell y L. F. Cabeza, «Use of microencapsulated PCM in buildings and the effect of adding awnings,» *Energy and Buildings*, vol. 44, pp. 88-93, 2012.
- [6] ONU, «Noticias ONU,» 17 Junio 2019. [En línea]. Available: <https://news.un.org/es/story/2019/06/1457891>. [Último acceso: 23 Enero 2021].
- [7] C. Europea, «Perspectivas de la evolución mundial hasta 2030 en los ámbitos de la energía, la tecnología y política climática.».
- [8] P. D. Pérez, «Tecnología en fachadas como estrategia en diseño sostenible,» Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2016.
- [9] I. N. d. Estadística. [En línea]. Available: <https://www.ine.es>.
- [10] A. M. Castellà, «Comprobando cómo funciona una fachada: estudio del comportamiento de la fachada en una vivienda de energía casi nula,» *Obras urbanas*, 22 Marzo 2018.
- [11] A. Cerezuela Parish, «Estudio térmico de las fachadas ventiladas con aletas de PCM,» Universidad de Sevilla, Sevilla, 2012.
- [12] «Morteros de Construcción y Ornamentación,» Universidad de Granada.
- [13] D. Gaspar-Tebar, «Aditivos para hormigones, morteros y pastas,» *Materiales de Construcción*, vol. 35, nº 200, 1985.

- [14] A. d. A. d. l. L. Española, «Real Academia Española,» [En línea]. Available: <https://dle.rae.es/aglomerante>.
- [15] E. Fransanc, «Transanc,» [En línea]. Available: <https://www.transanc.net/aridos2/queson-los-aridos-para-la-construccion/>.
- [16] E. Hekal, E. Kishar y H. Mostafa, «Magnesium sulfate attack on hardened blended cement pastes under different circumstances.,» *Cement and Concrete Research*, vol. 32, nº 9, pp. 1421-1427, 2002.
- [17] S. Hartshorn, J. Sharp y R. Swamy, «Thaumasite formation in Portland-limestone cement pastes,» *Cement and Concret Research*, vol. 29, nº 8, pp. 1331-1340, 1999.
- [18] R. M. Usedo Vallés, «Estudio y análisis de la utilización de la cal para el patrimonio arquitectónico.,» Universitat Politècnica de València, Valencia, 2016.
- [19] J. I. Álvarez Galindo, A. Martín Pérez y P. J. García Casado, «Historia de los morteros.,» *Dialnet*, nº 13, p. 8, 1995.
- [20] X. Mas Barberá, «Estudio y caracterización de morteros compuestos, para su aplicación en intervenciones de sellados, reposiciones y réplicas, de elementos pétreos escultórico-ornamentales.,» Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2008.
- [21] C. del Olmo Rodríguez, «Los morteros. Control de calidad.,» *Informes de la Construcción*, 1994.
- [22] J. Feijoo, R. Fort, L. Gómez-Villalba, M. Rabanal y L. Ottosen, «Electroprecipitation of Magnesium and Calcium Compounds for Weathering Protection of Ornamental Rocks,» vol. 20, nº 4, pp. 2337-2355, 2020.
- [23] L. Álvarez, E. Márquez y E. Velazco, «Obtaining and Characterization of the Metastable Vaterite Phase of Calcium Carbonate Catalyzed by Ag-Mg at Room Temperature,» *Ciencias básicas y tecnología*, vol. 30, pp. 67-99, 2018.
- [24] G. Price, M. Mahon, J. Shannon y C. Cooper, «Composition of Calcium Carbonate Polymorphs Precipitated Using Ultrasound,» *Crystal Growth & Design*, vol. 11, nº 1, pp. 39-44, 2010.
- [25] K. Van Balen y D. Van Gemert, «Modelling lime mortar carbonation,» *Material and Structures*, vol. 27, pp. 393-398, 1994.
- [26] L. Pocostales Plaza, «Descripción y evolución de las fases de carbonato cálcico presentes en los enlucidos de cal en pasta pintados al fresco,» Universidad Autónoma de Barcelona, Barcelona, 2015.
- [27] C. Barreneche, H. Navarro, S. Serrano, L. F. Cabeza y A. I. Fernández, «New database on phase change materials for thermal energy storage in buildings to help PCM selection,» Elsevier, 2014.
- [28] P. Dominguez Perez, «Tecnología en fachadas como estrategia de diseño sostenible.,» Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2016.
- [29] A. Abhat, «Short Term Thermal Energy Storage,» *Energy and Buildings*, vol. III, nº 1, pp. 49-76, 1981.

- [30] K. Sagara y Sharma, «Latent heat storage materiales and systems: a review.,» *International Journal of Green Energy*, vol. 2, nº 1, pp. 1-56, 2005.
- [31] A. Oliver, F. Neila y A. García-Santos, «Clasificación y selección de materiales de cambio de fase según sus características para su aplicación en sistemas de almacenamiento de energía térmica.,» *Materiales de construcción*, vol. 62, nº 305, pp. 131-140, 2011.
- [32] D. Juárez, R. Balart, S. Ferrándiz y D. García, «Study of Phase Change Materials (PCM) and SEM analysis of micro PCM.,» Area de Innovación y Desarrollo S.L, Valencia, 2012.
- [33] «Laurentia Technologies,» 11 Marzo 2016. [En línea]. Available: <https://www.laurentia.es/2016/04/11/pcms-para-regular-la-temperatura/>. [Último acceso: Febrero 2021].
- [34] M. Bistué Garcés, «Evaluación de impacto ambiental mediante análisis de ciclo de vida (ACV) de la incorporación de materiales de cambio de fase (PCM) en edificación.,» Zaragoza, 2014.
- [35] A. Thiele, «Microencapsulated Phase Change Composite Materials for Energy Efficient Buildings,» Universidad de California, Los Angeles, 2016.
- [36] Osterman, Tyagi, Butala, Rahim y Stritih, «Review of PCM based cooling technologies for buildings,» 2012.
- [37] V. A. Zetola Vargas, «Morteros acumuladores con parafinas microencapsuladas para el aprovechamiento de la energía solar en suelos radiantes.,» 2013.
- [38] A. S. University, «Phase Change Material (PCM) technologies will be critical to the cold transport and storage of new COVID-19 vaccines.,» Universidad de Arizona, Arizona, 2020.
- [39] T. Ma, J. Zhao y J. Han, «A Parametric Study about the Potencial to Integrate Phase Change Material into Photovoltaic Panel,» *Energy Procedia*, vol. 142, pp. 648-654, 2017.
- [40] L. Socaciu, «PCM selection using the AHP method to maintain thermal confort of the vehicules occupants,» *Energy Procedia*, vol. 85, pp. 489-497, 2016.
- [41] D. Juárez Varón, S. Ferrandiz Bou, M. Á. Peydró Rasero y A. Mengual Recuerda, «Aplicaciones industriales de los materiales de cambio de fase.,» Área de Innovación y Desarrollo, S.L., Valencia, 2015.
- [42] S. Ebadi, M. Al-Jethelah, S. H. Tasnim y S. Mahmud, «An investigation of the melting process of RT-35 filled circular thermal energy storage system.,» *Open Physics*, vol. 16, nº 1, pp. 574-580, 2018.
- [43] V. Butala y U. Stritih, «Experimental investigation of PCM cold storage,» *Energy and Buildings*, vol. 41, nº 3, pp. 354-359, 2009.
- [44] V. Butala y U. Stritih, «Experimental investigation of energy saving in building with PCM cold storage,» *International Journal of Refrigeration*, vol. 33, nº 8, pp. 1676-1683, 2010.
- [45] Setaram, «Análisis Térmico Labsys Evo».
- [46] L. Traversa, F. Iloro y D. Benito, «Determinación mediante ensayos térmicos del CO2 absorbido por morteros de cemento.,» *Ciencia y tecnología de los materiales*, nº 3, 2013.

- [47] R. Fort, «Tratamientos de conservación y restauración de geomateriales: Tratamientos de consolidación e hidrofugación. Curso postgrado CSIC “La conservación de los geomateriales utilizados en el patrimonio”,» Programa Geomateriales (Comunidad de Madrid y Fondo Social Europeo), Madrid, 2011.
- [48] A. E. d. N. Certificación, «Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total UNE EN 1936».
- [49] «Micromeritics,» [En línea]. Available: <https://www.micromeritics.com/Product-Showcase/AutoPore-IV/AutoPore-IV-Spanish-Translation.aspx>. [Último acceso: Febrero 2021].
- [50] D. Benavente García, «Modelización y estimación de la durabilidad de materiales pétreos porosos frente a la cristalización de sales,» Alicante, 2002.
- [51] E. Winkler, *Stone in architecture: Properties and Durability*, Springer, 1994.
- [52] A. E. d. N. Certificación, «Norma UNE EN 1925:1999,» AENOR, 1999.
- [53] N. Pérez Ema, «Evaluación de los efectos derivados de las intervenciones de restauración realizadas sobre material pétreo: teatro romano y casa del mitreo de Mérida,» Universidad Politécnica de Madrid, 2017.
- [54] A. Luque, E. Sebastián, M. De la Torre, G. Cultrone, E. Ruiz y M. Urosevic, «Estudio comparado de morteros de cal en pasta y cal en polvo. Control de carbonatación,» *MACLA*, vol. 6, pp. 293-296, 2006.
- [55] O. Lantes-Suárez, P. Prieto Martínez y A. Martínez-Cortizas, «Aplicación de la Microscopía Electrónica de barrido al estudio de los acabados de cerámica antigua de Galicia,» *Dialnet*, vol. 30, pp. 117-125, 2010.
- [56] «Microscopia Electrónica de Barrido con detector EDS (SEM-EDS),» Universidad Andrés bello.
- [57] «SINT Technology,» [En línea]. Available: <https://sint-technology.com/drilling-resistance-measurement-system/>. [Último acceso: 9 Marzo 2021].
- [58] H. Aoki y Y. Matsukura, «Estimating the unconfined compressive strength of intact rocks from Equotip hardness,» *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 67, pp. 23-29, 2008.
- [59] N. U.-E. 12390-3, «Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas,» 2020.
- [60] R. F. Duygu Ergenc, «Accelerating carbonation in lime-based mortar in high CO2 enviroments,» *Construction and Building Material*, vol. 188, nº 10, pp. 314-325, 2018.
- [61] D. M. Freire Lista, «El granito como piedra de construcción en Madrid: durabilidad y puesta en valor,» Universidad Complutense de Madrid, Madrid, 2016.
- [62] J. Feijoo, X. Nóvoa y T. Rivas, «Electrokinetic treatment to increase bearing capacity and durability of a granite,» *Materials and Structures*, vol. 50, nº 251, 2017.

- [63] L. Sousa, L. Suárez del Río, L. Calleja, V. Ruiz de Argandoña y A. Rodríguez Rey, «Influence of microfractures and porosity on the physico-mechanical properties and weathering of ornamental granites,» *Eng Geol*, vol. 77, pp. 153-168, 2005.
- [64] J. Rodríguez y V. Fernández, *Cómo redactar el estado del arte de un trabajo*, Editorial Genios, 2010.
- [65] I. T. d. I. Energía. [En línea]. Available: <http://www.ite.es/aprobada-la-revision-la-directiva-eficiencia-energetica-edificios/>.
- [66] M. Arandigoyen y J. Álvarez, «Proceso de carbonatación en pastas de cal con distinta relación de agua/conglomerante,» *Materiales de construcción*, vol. 56, nº 281, pp. 5-18, 2006.
- [67] M. Á. Soria Gallego, «Estudio sobre sistemas de aislamiento térmico exterior,» Universidad Jaime I, Castellón, 2017.

ANEXO I: SELECCIÓN DE MATERIALES

Data sheet



RT35HC



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

Properties for RT-line:

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

The most important data:

Melting area

Congeaing area

Heat storage capacity $\pm 7,5\%$

Combination of latent and sensible heat in a temperatur range of 27°C to 42°C.

Specific heat capacity

Density solid

at 25°C

Density liquid

at 40°C

Heat conductivity (both phases)

Volume expansion

Flash point

Max. operation temperature

Typical Values

34-36 [°C]

main peak: 35

36-34 [°C]

main peak: 35

240 [kJ/kg]*

67 [Wh/kg]*

2 [kJ/kg·K]

0,88 [kg/l]

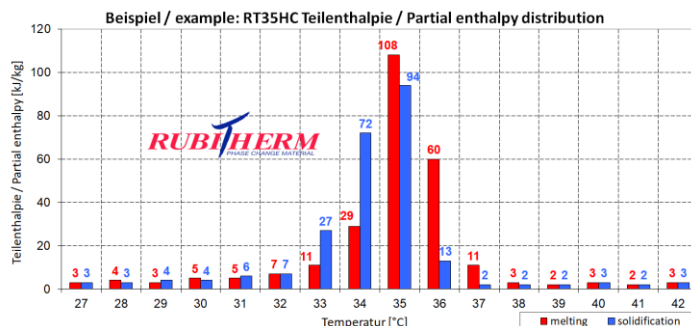
0,77 [kg/l]

0,2 [W/(m·K)]

12 [%]

177 [°C]

70 [°C]



Rubitherm Technologies GmbH
Imhoffweg 6
D-12307 Berlin
phone: +49 (30) 7109622-0
E-Mail: info@rubitherm.com
Web: www.rubitherm.com

The product information given is a non-binding planning aid, subject to technical changes without notice.
Version: 09.10.2020

*Measured with 3-layer-calorimeter.

ANEXO II: CONTENIDO DEL SEGUNDO ANEXO



ARENA SILICE FLOWER

90093

FICHA TÉCNICA



INTRODUCCIÓN

La **ARENA DE SILICE FLOWER** es un compuesto resultante de la combinación del Sílice con el Oxígeno.

Su composición química está formada por un átomo de sílice y dos átomos de Oxígeno, formando una molécula muy estable: SiO_2 . Esta molécula es insoluble en agua y en la naturaleza se encuentra en forma de cuarzo.



COMPOSICIÓN

Arena de sílice blanca 9/12.
Granulometría: 1'48 mm

PRESENTACIÓN

Se presenta en:
Saco de 20 Kg

PRINCIPALES APLICACIONES

La **ARENA DE SÍLICE FLOWER** puede emplearse con diversas finalidades. Sus propiedades se manifiestan según el lugar donde sean colocadas:

COLOCADA SUPERFICIALMENTE COMO MATERIAL DECORATIVO:

Material decorativo utilizado en jardines, parterres, jardineras y macetas.
Disminuye la evaporación de agua procedente del terreno o sustrato.
Bajo mantenimiento; consigue un terreno más limpio y saludable.

PARA DRENAJE DE LAS MACETAS Y JARDINERAS.

PARA EL RECEBADO DEL CESPED DE JARDIN.

COLOCADA PARA EL CESPED ARTIFICIAL:

La arena de sílice proporciona al césped artificial el sustento vertical para recuperar su posición original después de ser pisado.

COLOCADA COMO SUBSTRATO EL AQUARIO.

PARA FILTROS DE AGUA O PISCINAS.

COMO TIERRA PARA GATOS.

ANEXO III: CONTENIDO DEL SEGUNDO ANEXO



Cementos Tudela Veguín, S.A.U.

MASAVEU • INDUSTRIA

FICHA TÉCNICA

PRODUCTO	Cal hidratada CL 90-S
NORMATIVA	UNE-EN 459-1 "Cales de construcción"
COMPUESTO QUÍMICO	Hidróxido de calcio, Ca(OH)_2
ASPECTO	Polvo de color blanco
NÚMERO DE REGISTRO REACH	01-2119475151-45-0211

 0099 03 EN 459-1:2010 CL 90-S	Usos previstos: Preparación de conglomerante para morteros (de albañilería, revoco y enlucido), la fabricación de otros productos de construcción y para aplicaciones en ingeniería civil (tratamiento de suelos, mezclas asfálticas, etc.).
	0099/CPD/A46/0003

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

ENSAYO	ESPECIFICACIÓN (UNE-EN 459-1)	VALOR TÍPICO ⁽²⁾
CaO + MgO	$\geq 90 \%$ ⁽¹⁾	96,0 % ⁽¹⁾
MgO	$\leq 5 \%$ ⁽¹⁾	0,7 % ⁽¹⁾
CO ₂	$\leq 4 \%$ ⁽¹⁾	2,0 % ⁽¹⁾
SO ₃	$\leq 2 \%$ ⁽¹⁾	0,1 % ⁽¹⁾
Cal útil	$\geq 80 \%$ ⁽¹⁾	94,0 % ⁽¹⁾
Agua libre	$\leq 2 \%$	0,3 %
Estabilidad de volumen	$\leq 2 \text{ mm}$	0,3 mm
Rechazo 90 micras	$\leq 7 \%$	2,7 %
Rechazo 200 micras	$\leq 2 \%$	0,0 %
Penetración	$> 10 \text{ y } < 50 \text{ mm}$	35 - 45 mm

⁽¹⁾ Sobre muestra exenta de agua libre y combinada

⁽²⁾ Los valores típicos son valores medios representativos de la calidad del producto, estando sujetos a posibles variaciones. A efectos de conformidad se deben considerar los límites de la especificación.

ANEXO IV: CONTENIDO DEL SEGUNDO ANEXO



Labsys Evo – Putting into service / Applications

6. Technical characteristics

6.1. Labsys™ Evo

- Single-phase mains power supply 230 V $\pm$ 10 % 50/60 HZ
- Total power input 820 VA
- Safety equipment
 - Furnace and sample safety temperatures are software programmable
 - Water circulation safety device
 - Furnace opening safety device: the furnace cannot be opened when the pressure in the analysis chamber is below 680mbar or when the temperature exceeds 70°C
- Gas inlet pressure 3 bars max.
- Water inlet pressure 3 bars max.
- Ambient operating temperature 5°C to 40°C
- Relative humidity Max. 80% for ambient T up to 31°C, then reducing to 50% for T° of 40°C.
- Dimension: LxHxD
 - Work position 530 x 560 x 580 mm
 - High position 530 x 760 x 580 mm
- Weight 55 kg
- Working temperature range

LABSYS EVO 1150

Ambient to 1150°C. (Standard Utilisation)

These values can vary according to the sensors, crucibles, sweeping gas used, therefore it is vital to refer to the manual.

LABSYS EVO 1600

Ambient to 1400°C. (Standard Utilisation)

1600°C (Outstanding Utilisation)

These values can vary according to the sensors, crucibles, sweeping gas used, therefore it is vital to refer to the manual.

- Temperature scanning rate 0.001 to 100°C/min.
Note: there can be a risk of wear during intensive use at scanning rates exceeding 50°C/min.
- Sample volume According to sensor used
 - Alumina crucible : 20, 80, 90 and 440 ml
 - Platinum crucible : 20, 80, 100, 380 and 500 ml
 - Aluminium crucible : 80 and 100 ml



Labsys Evo – Putting into service / Applications

CAUTION Use the apparatus *LabsysTM Evo 1600* above the temperature of 1400°C during a long time cause a premature ageing of the furnace and the rods. It is recommended to limit the duration of the isotherm phases above 1400°C to 30 minutes. It is recommended to heat up at more than 2°C/min above 1400°C.

6.2. Nature of the materials in contact with the gases

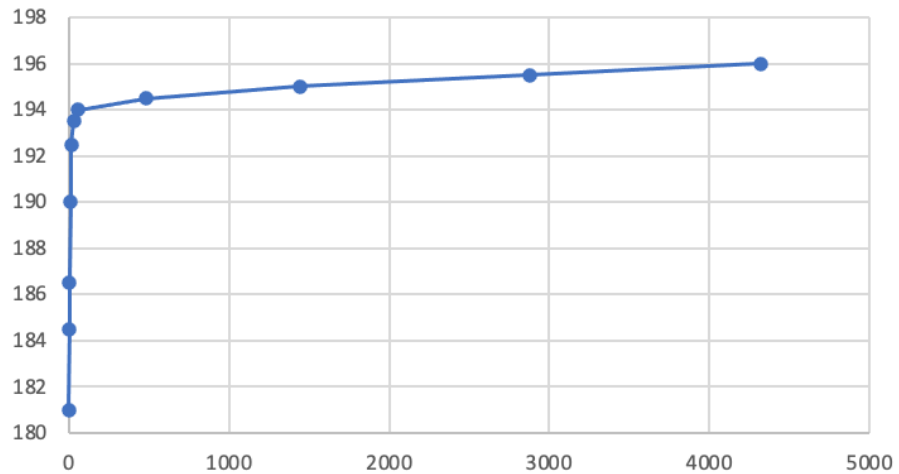
Gas tubes	PU for Standard version / Stainless steel for Gas panel version
Union	Brass/stainless steel
Analysis chamber	Alumina, Dural,
Sensor (depending on type)	Chromel, Constantan, platinum, alumina, platinel, Alumel
Balance	Dural, Stainless steel, platinum, Teflon,
Crucible	Aluminium, platinum, alumina

6.3. Conformity with standards

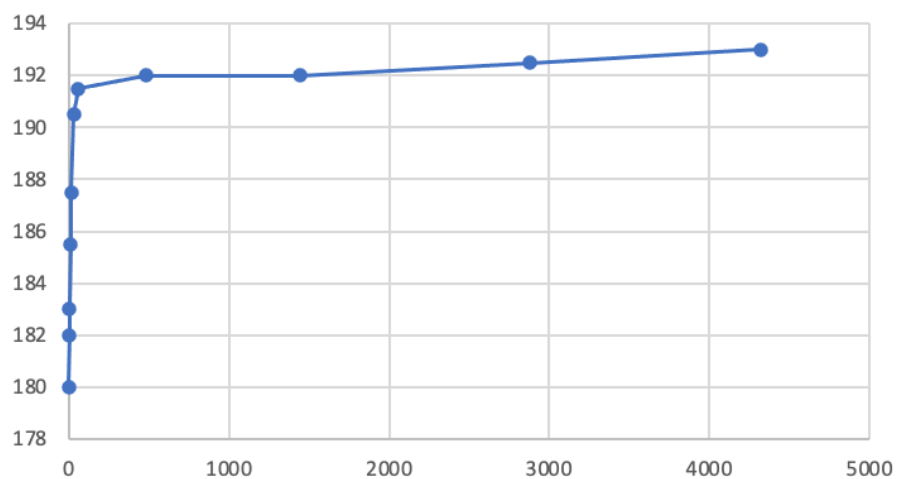
- Low tension directive 2006/95/CE
- European Directive 2004/108/CE
- EN61326-1
- EN61326/A1
- EN61326/A2
- EN61010-1 and EN 61010-2-81

ANEXO V: POROSIDAD CAPILAR

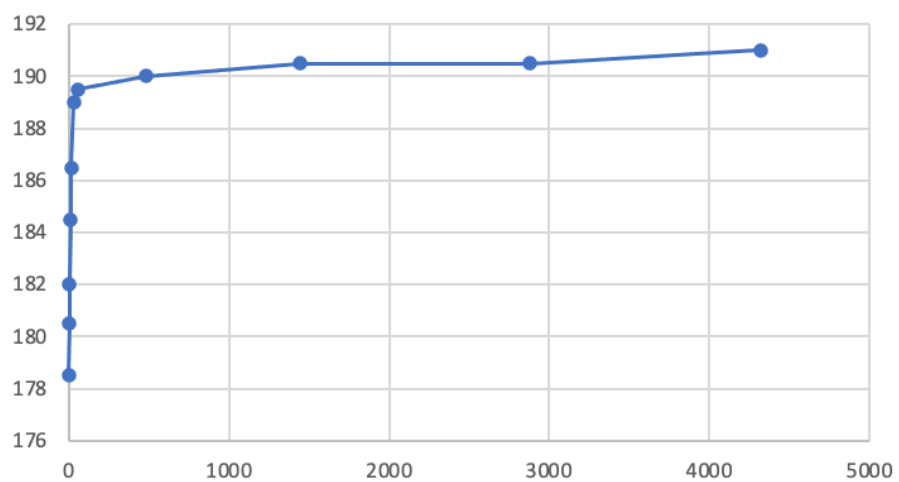
PC0-4



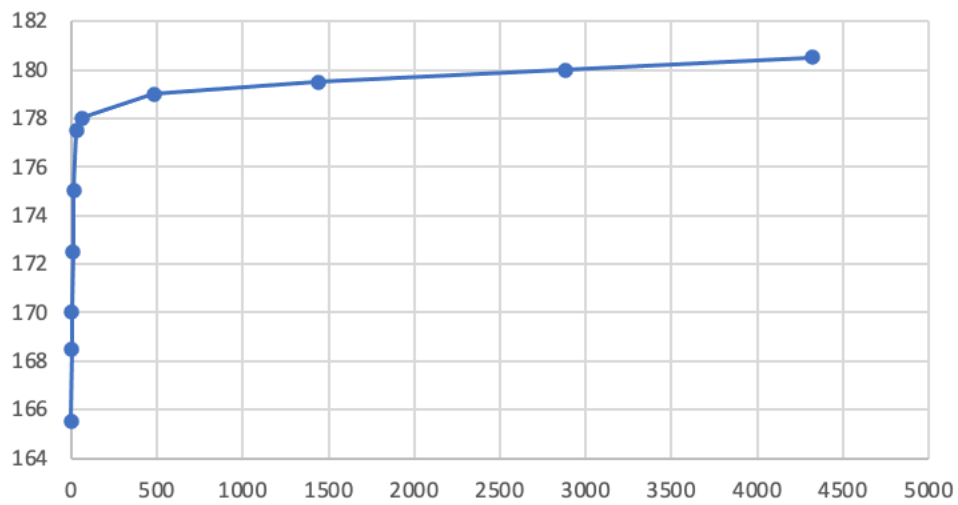
PC10-5



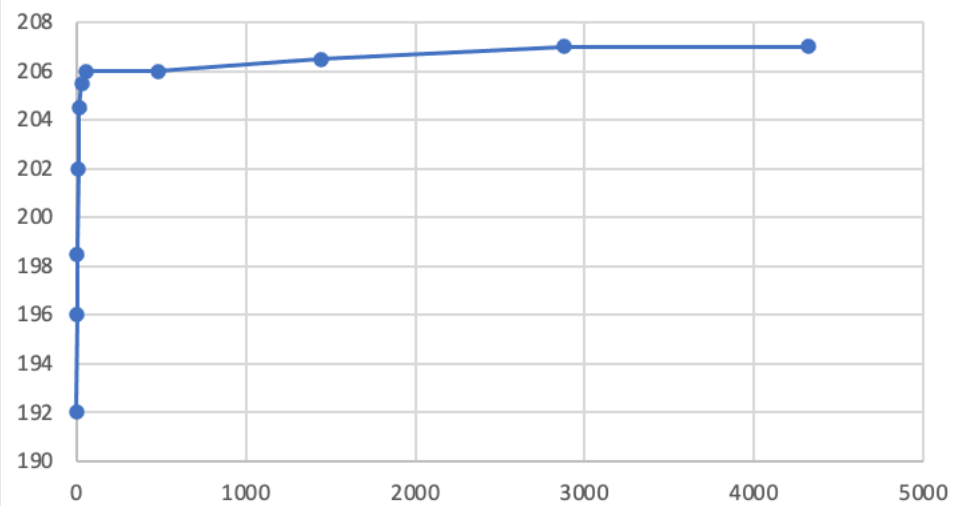
PC10-6



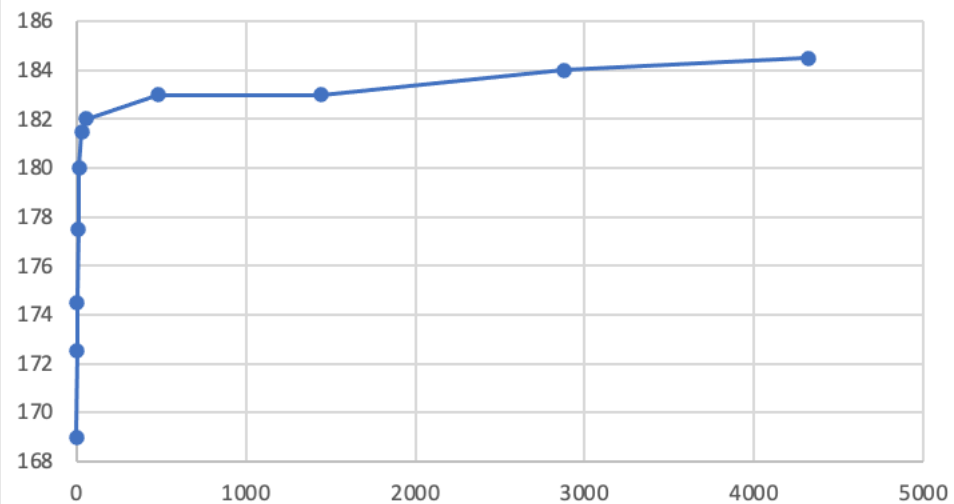
PC5-9



PC0-2



PC5-8



ANEXO VI: LISTADO RELACIÓN MUESTRA Y ENSAYOS

Geometría	Dimensiones	Unidades/ ensayo	Dosificación	Ensayo
Cilindro grande	5,3x13cm	3	Referencia	Compresión uniaxial
			5% PCM	
			10% PCM	
Cilindro pequeño	3,8Ø x1,9	3	Referencia	TG
			5%	
			10%	
Cilindro pequeño	3,8Ø x1,9	1	Referencia	SEM-EDS (Uvigo)
			5%	
			10%	
Cilindro pequeño	3,8Ø x1,9	1	Referencia	Porosidad accesible al mercurio, distribución porosimétrica y tortuosidad (IGEO)
			5%	
			10%	
Cilindro pequeño	4,7x4,7cm	2	Referencia	Porosidad capilar
			5%	
			10%	
Cubo	4,7x4,7cm	3	Referencia	Porosidad abierta
			5%	
			10%	
Cubo	4,7x4,7cm	1	Referencia	Ultrasonidos y anisotropía (IGEO)
			5%	
			10%	
Cono	4,5Øx6,3Øx9,1cm	6	Referencia	FLIR
			5%	
			10%	

ANEXO VII: FICHA TÉCNICA DEL APARATO DE ENSAYO UNIVERSAL

Página 1/3
11/2002

WP 300 **APARATO DE ENSAYO UNIVERSAL, 20 KN**



Descripción

El equipo para ensayo de materiales es un equipo universal de mesa para enseñanza. Sencillo manejo y sólida construcción favorecen la aplicación en el experimento escolar. La gama de ensayos abarca en el equipo básico ensayos de tracción y compresión y comprobaciones de dureza según Brinell. Mediante los accesorios optativos pueden realizarse adicionalmente ensayos de flexión, de cizallamiento y de embutición. También existe la posibilidad de registro y evaluación de los datos asistido por ordenador.

En su equipamiento básico, el aparato no requiere alimentación adicional alguna. La fuerza de comprobación se genera mediante un sistema hidráulico operado manualmente. Para su indicación sirve un instrumento indicador de grandes dimensiones con aguja de arrastre. El alargamiento de las piezas a comprobar se registra mediante un pie de rey mecánico. El aparato puede equiparse con un sistema electrónico para mediación de la fuerza y del desplazamiento. Este aparato se distingue por su diseño esquemático y cambio rápido de los accesorios.

Ensayos

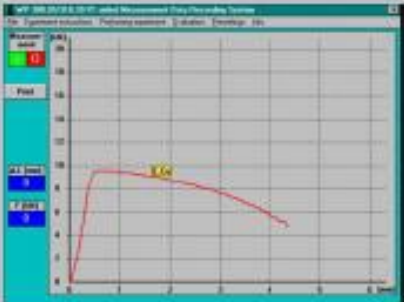
- Ensayos de tracción y compresión
- Registro de diagramas de tensión-dilatación
- Comprobación de dureza según Brinell

Con accesorios que puede suministrarse aparte:

- Ensayo de flexión
- Ensayo de embutición
- Ensayo de cizallamiento
- Comprobación de resorte de plato y helicoidales

- Universal equipo esquemático para ensayos de los principios fundamentales de la comprobación de materiales
- Ensayo de tracción, compresión, flexión, cizallamiento y embutición
- Comprobación de dureza según Brinell
- Registro de líneas características de resorte
- Ampliable con registro electrónico de los datos de medición

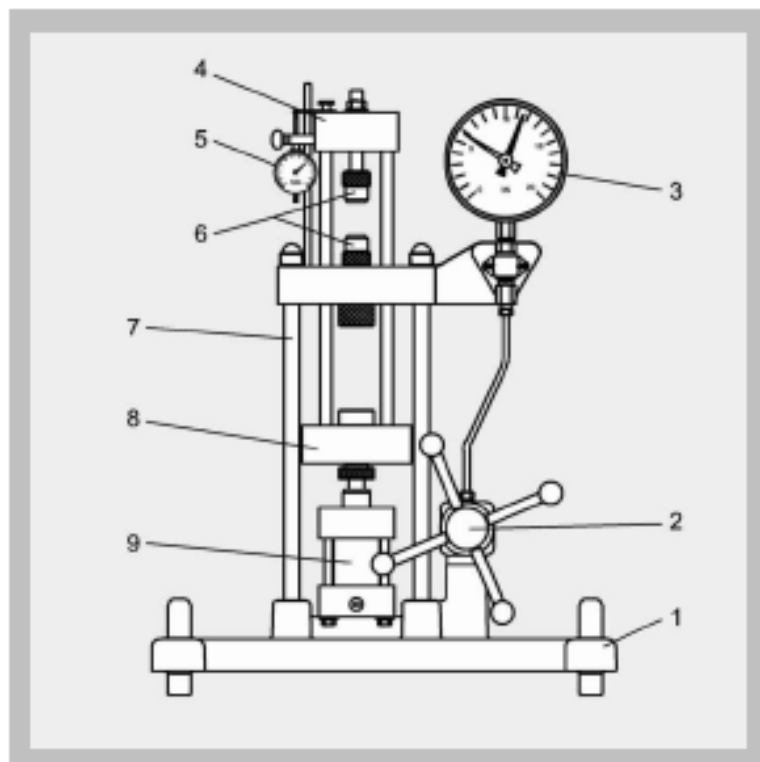




Registro de un diagrama de tensión-expansión con ayuda del sistema para adquisición de datos asistida por ordenador WP 300 20

WP 300

APARATO DE ENSAYO UNIVERSAL, 20 kN



1 base de la máquina con ples de goma, 2 volante manual, 3 indicador de fuerza, 4 travesa superior, 5 ple de rey para carrera de deformación, 6 cabezal de fijación, 7 columnas de bastidor, 8 travesa inferior, 9 cilindro hidráulico principal

Especificación

- [1] Equipo de mesa universal para comprobación de materiales
- [2] Fuerza de comprobación máx. 20kN
- [3] Carrera máx. 45mm
- [4] Sector de instalación libre para piezas a comprobar 165x65mm
- [5] Dinamómetro 0...20kN, graduación 0,5kN; instrumento indicador con manilla de arrastre, Ø160mm
- [6] Rango de medición para alargamiento 0...10mm / 0,01mm
- [7] Pruebas de tracción B6x30 DIN 50125
- [8] Pruebas de dureza LxAnxAl 30x30x10mm
- [9] Diámetro de la bola de comprobación Ø10mm
- [10] Generación de la fuerza mediante sistema hidráulico operado manualmente, no se requiere suministro eléctrico
- [11] Bastidor de travesas con columnas de acero pulido, posible generación de la fuerza de compresión y de tracción
- [12] Base de la máquina de fundición, con ples de goma
- [13] LxAnxAl 610x520x850mm

Datos técnicos

Fuerza de comprobación máx.: 20kN
Carrera máx.: 45 mm
Sector libre de montaje para piezas a comprobar: 165x65mm
Dinamómetro: 0...20kN, graduación: 0,5kN
Calibre de alargamiento: 0...10mm, graduación: 0,01mm
Prueba de tracción: B6x30 DIN 50125
Prueba de dureza: LxAnxAl 30x30x10mm
Diámetro de la bola de comprobación: Ø10mm

Dimensiones y pesos

L x An x Al: 610 x 520 x 850 mm
Peso: aprox. 51 kg

Conexiones

Volumen de suministro

1 equipo básico, 1 dispositivo de comprobación de la dureza, 1 ple de rey, 4 juegos de muestras de tracción B6x30 DIN 50125, 4 juegos de muestras de dureza, 1 Instrucciones de ensayo

Nº de artículo

020.30000 WP 300 Aparato de Ensayo Universal, 20kN

Ejemplos de resultados de la medición

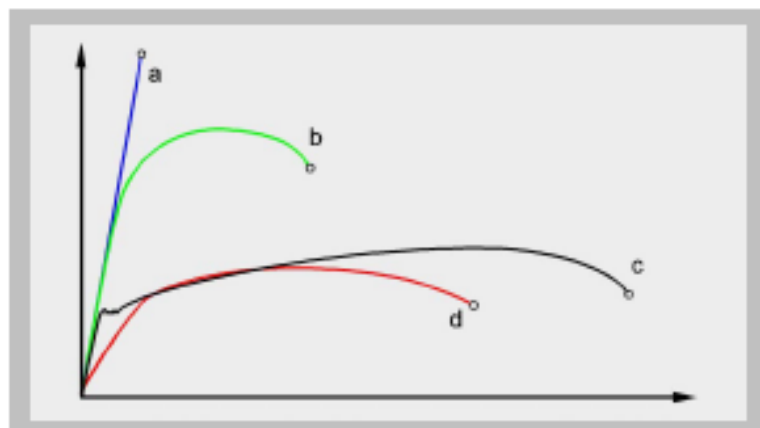


Diagrama de fuerza-alargamiento para diferentes materiales de muestras:

- a) acero templado
- b) acero de bonificación
- c) acero dulce recocido
- d) aluminio aleado