



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Estudio sobre la incorporación de materiales de
cambio de fase en elementos constructivos*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: José Antonio Soto Socolí
DIRECTORES: Miguel Ángel Álvarez Feijoo
Elena Arce Fariña
CURSO ACADÉMICO: 2016-2017

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Estudio sobre la incorporación de materiales de
cambio de fase en elementos constructivos*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

Universida_deVigo

RESUMEN

Los materiales de cambio de fase, en inglés Phase Change Materials (PCM), son sustancias empleadas para almacenar energía térmica aprovechando un cambio de estado, generalmente de sólido a líquido o viceversa. Una de las principales líneas de investigación y desarrollo de estos materiales se centra en la reducción del consumo de energía de climatización en edificios de viviendas y oficinas, centros comerciales, etc.; ya que permiten reducir la oscilación térmica en el interior de dichas edificaciones con la consiguiente mejora de la eficiencia energética.

El principal objetivo del presente trabajo consiste en la elaboración y estudio de probetas, en las que se combinarán materiales de construcción con diferentes tipos de PCM. Para obtener las probetas se recurrirá a una matriz de hormigón, aunque también se podría emplear otros materiales, a la que se incorporará el PCM en distintas proporciones. Los PCM empleados no disponen de encapsulamiento y pertenecen al grupo de las sales hidratadas. Con la información obtenida de los diferentes ensayos se realizará un análisis sobre la viabilidad y empleo de estos materiales para la mejora de la eficiencia térmica. Además, los resultados de este trabajo permitirán ampliar los conocimientos sobre la aplicación de PCM en elementos constructivos y su empleo en edificaciones para una mejora tanto en los acondicionamientos, como el confort y la gestión medioambiental. Finalmente, se mostrarán las conclusiones obtenidas de este trabajo y se plantearán posibles líneas de continuación.

PALABRAS CLAVE

PCM, hormigón, eficiencia energética, resistencia a compresión, ensayos térmicos

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo supone el broche final a cinco abnegados años de intenso esfuerzo y sacrificio, cuyo fin último siempre ha sido y será la dedicación y el amor a la Patria. Durante todo este tiempo he aprendido que más allá de los conocimientos teóricos, lo verdaderamente importante es la necesidad de crecerse ante las dificultades y la voluntad de vencer. Como militares, nunca debemos olvidar que caer está permitido, pero levantarse es obligatorio.

Todos los de mí alrededor han contribuido en cierta manera a forjarme como Oficial de la Armada, por ello que sirvan estas palabras de agradecimiento por su incesante labor.

A mi familia, que sin su apoyo nada de esto hubiera sido posible.

A Víctor, Cabello, Padrón, Morales, Perico y demás compañeros que me han soportado durante tanto tiempo, pero que siempre me han apoyado en los momentos más difíciles.

Y por último, a mis tutores, que sin su desinteresada ayuda y esfuerzo me han ayudado durante toda la realización de este trabajo.

No quisiera finalizar sin mencionar antes una frase que mis brigadieres grabaron a sangre y fuego en mí durante los primeros días de estancia en esta escuela, y que siempre ha iluminado mi derrota durante la tormenta. La frase reza lo siguiente:

“Estudiar es ya servir a España”

CONTENIDO

1	Introducción y objetivos	1
1.1	Presentación	1
1.2	Panorama energético: demanda y eficiencia	2
1.2.1	Eficiencia energética en construcciones	3
1.3	Motivación y objetivos del TFG	4
1.4	Organización de la memoria	5
2	Estado del arte	7
2.1	Introducción	7
2.2	Formas de almacenamiento de energía térmica	7
2.3	Materiales de cambio de fase	9
2.3.1	Generalidades	9
2.3.2	Principales características	10
2.3.3	Clasificación	12
2.3.4	Aplicaciones	16
2.4	PCM en edificación.....	17
2.4.1	Generalidades	17
2.4.2	Hormigón y PCM	20
3	Desarrollo del proyecto	24
3.1	Pasos previos a la realización de los ensayos	24
3.1.1	Instrumentación y equipos de mediciones	24
3.1.2	Materiales y compuestos empleados	29
3.1.3	Medidas de precaución	31
3.2	Elaboración de las probetas.....	32
3.2.1	Normativa y especificaciones de las probetas a realizar	32
3.2.2	Preparación de los moldes	33
3.2.3	Elección de la dosificación	35
3.2.4	Proceso de elaboración de las probetas.....	42
3.3	Ensayos realizados	47
3.3.1	Estudio de la temperatura de cambio de fase de los PCM.....	47
3.3.2	Calculo de la densidad y estudio de la pérdida de humedad de las probetas.....	49
3.3.3	Ensayos de dureza.....	49
3.3.4	Ensayos a compresión.....	51
3.3.5	Análisis microscópico de las probetas de hormigón.....	53

3.3.6 Ensayo de la conductividad térmica de las probetas.....	54
4 Resultados	57
4.1 Caracterización de los PCM empleados.....	57
4.1.1 Introducción	57
4.1.2 Análisis de los resultados obtenidos mediante DSC.....	58
4.1.3 Estudio de la temperatura de cambio de estado de los PCM.....	60
4.2 Ensayos a compresión	65
4.2.1 Ensayos de las probetas pequeñas	65
4.2.2 Ensayos de las probetas grandes	74
4.3 Ensayos de dureza	75
4.4 Estudio de la variación de la cantidad de agua en las probetas.....	76
4.5 Análisis de los fragmentos de las probetas	77
4.6 Estudio de la conductividad térmica de las probetas	78
5 Conclusiones y líneas futuras	87
5.1 Revisión de los objetivos	87
5.2 Conclusiones	87
5.3 Líneas futuras	89
5.3.1 Aplicación en el ámbito de la Armada	89
6 Bibliografía.....	91
ANEXO I: TABLAS AMPLIATORIAS	95
ANEXO II: FICHA TÉCNICA DEL APARATO DE ENSAYOS UNIVERSAL.....	105
ANEXO III: FICHA TÉCNICA DEL DURÓMETRO PCE-HT-225A	109
ANEXO IV: FICHA DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL PLASTIFICANTE	113
ANEXO V: FICHA DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL CEMENTO.....	115
ANEXO VI: FICHA DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL POLIESTIRENO EXPANDIDO	117
ANEXO VII: MICROSCOPIO MBL3300	121
ANEXO VIII: PROBETAS PEQUEÑAS TRAS SU EXTRACCIÓN DEL MOLDE.....	122

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Escala de la calificación energética [55]	1
Figura 1-2 Evolución de la dependencia energética [53].....	2
Figura 1-3 Consumo de energía en España durante el año 2015 (Elaboración propia basado en [54]) ...	3
Figura 2-1 Formas de almacenamiento de energía	7
Figura 2-2 Gráfica calor latente y calor sensible [56].....	8
Figura 2-3 Breve reseña histórica (elaboración propia basada en [5])	9
Figura 2-4 Características de los cambios de estado (elaboración propia basado en [1, 5, 8]).....	10
Figura 2-5 Clasificación de materiales de cambio de fase (Elaboración propia basada en [7, 49])	12
Figura 2-6 Entalpía de fusión frente a la temperatura de fusión de los diferentes tipos de PCM [50] ...	13
Figura 2-7 PCM incorporado en fibras textiles [51]	16
Figura 2-8 (a) Ventajas de los PCM como sistemas TES. (b) Esquema energético de un elemento con PCM [52].....	17
Figura 2-9 Atenuación de los picos de temperatura debido a la inercia térmica [15].....	17
Figura 2-10 Comparativa del espesor (cm) requerido por diferentes materiales para mantener una misma inercia térmica [9]	18
Figura 2-11 Ejemplo de aplicación de PCM microencapsulado [9]	19
Figura 2-12 Ejemplos de PCM macroencapsulados [6].....	19
Figura 2-13 Aplicaciones de los PCM a la edificación [1]	19
Figura 2-14 Características según el estado del hormigón	20
Figura 2-15 Tipos de hormigón [6].....	21
Figura 2-16 Imagen con microscopio de PCM en hormigón (75 μ m x75 μ m) [53].....	22
Figura 2-17 Casetas construidas para el estudio de la Universidad de Lleida [19]	22
Figura 3-1 Balanza analítica Blauscal.....	25
Figura 3-2 Agitador magnético con calefacción BELL SH2	25
Figura 3-3 Termómetro compacto	25
Figura 3-4 Aparato de ensayos universal [25]	26
Figura 3-5 Durómetro	27
Figura 3-6 Adaptador USB DS9490B#	28
Figura 3-7 Sensor iButton DS1923	28
Figura 3-8 Dimensiones iButton DS1923	28
Figura 3-9 Sensor iButton DS1922L-F5#.....	29
Figura 3-10 Microscopio MBL3300	29
Figura 3-11 Manipulación tras calentar el PCM.....	31

Figura 3-12 Poliestireno extruido como aislante	32
Figura 3-13 Realización del corte del tubo de PVC.....	34
Figura 3-14 Moldes para las probetas pequeñas	35
Figura 3-15 Relación a/c frente a resistencia a compresión [56].....	35
Figura 3-16 Características del cemento empleado	36
Figura 3-17 Primeras probetas	38
Figura 3-18 Probetas a las 24 horas (de izq. a der. dosificaciones 1, 2, 3 y 4).....	41
Figura 3-19 Probetas a los 7 días (de izq. a der. dosificaciones 1, 2, 3 y 4).....	41
Figura 3-20 Preparación de los materiales	42
Figura 3-21 Pesado de los diferentes materiales	43
Figura 3-22 Mezclado de los materiales	43
Figura 3-23 Amasada de hormigón.....	43
Figura 3-24 Llenado de las probetas pequeñas	44
Figura 3-25 Compactación del hormigón	44
Figura 3-26 Nivelado de la superficie de la probeta	45
Figura 3-27 Probetas finales en los moldes	45
Figura 3-28 Proceso de hidratación de las probetas pequeñas y el hormigón sobrante de la amasada ..	46
Figura 3-29 Influencia del curado en la resistencia a compresión del hormigón [57].....	46
Figura 3-30 Identificado de las muestras	47
Figura 3-31 Calentamiento del PCM	47
Figura 3-32 Enfriamiento del PCM	48
Figura 3-33 Funcionamiento del esclerómetro	49
Figura 3-34 Ensayo de dureza.....	50
Figura 3-35 Nivelación de las probetas.....	51
Figura 3-36 Montaje de la máquina para probetas grandes (izq.) y pequeñas (der.).....	52
Figura 3-37 Roturas satisfactorias en probetas cilíndricas [40].....	52
Figura 3-38 Roturas no satisfactorias en probetas cilíndricas [40].....	52
Figura 3-39 Diferentes roturas de probetas	53
Figura 3-40 Fabricación de los módulos.....	54
Figura 3-41 Interior de la caja con el sensor instalado en la probeta.....	55
Figura 3-42 Módulos terminados sin las tapaderas.....	55
Figura 4-1 Esquema DSC [59].....	57
Figura 4-2 Zonas de las curvas calorimétricas.....	58
Figura 4-3 Gráficas de los tres PCM mediante DSC	59
Figura 4-4 Gráficas acetato de sodio para la 1ª medición (calentamiento a la izq. y enfriamiento a la der.)	60

Figura 4-5 Gráficas acetato de sodio 2ª medición (calentamiento a la izq. y enfriamiento a la der.).....	61
Figura 4-6 Gráficas sodio tiosulfato para la 1ª medición (calentamiento a la izq. y enfriamiento a la der.)	62
Figura 4-7 Aspecto del sodio tiosulfato tras ser enfriado	62
Figura 4-8 Gráficas sodio tiosulfato (2ª medición).....	63
Figura 4-9 Gráficas zinc nitrato (1º medición)	63
Figura 4-10 Aspecto del zinc nitrato tras su solidificación.....	64
Figura 4-11 Gráficas zinc nitrato (2º medición)	64
Figura 4-12 Probetas tras los ensayos	66
Figura 4-13 Probetas tras los ensayos	67
Figura 4-14 Probetas tras los ensayos	68
Figura 4-15 Probetas tras los ensayos	69
Figura 4-16 Probetas tras los ensayos	70
Figura 4-17 Gráficas resistencia del hormigón de muestra (sin PCM).....	71
Figura 4-18 Gráficas del acetato de sodio.....	71
Figura 4-19 Gráficas del sodio tiosulfato.....	72
Figura 4-20 Gráficas del zinc nitrato	72
Figura 4-21 Gráficas para un 1% de PCM.....	73
Figura 4-22 Gráficas para un 2% de PCM.....	73
Figura 4-23 Gráficas para un 3% de PCM.....	74
Figura 4-24 Probetas tras los ensayos	75
Figura 4-25 Variación de la cantidad de agua en las probetas (gr).....	77
Figura 4-26 Vistas de los fragmentos de las probetas a través de microscopio.....	78
Figura 4-27 Interfaz software iButton.....	79
Figura 4-28 Gráficas de las temperaturas de todos los sensores.....	80
Figura 4-29 Gráficas temperaturas sensores probeta de hormigón sin PCM.....	81
Figura 4-30 Gráficas temperaturas sensores probeta con sodio tiosulfato 1%	82
Figura 4-31 Gráficas temperaturas sensores probeta con acetato de sodio 1%	82
Figura 4-32 ΔT entre los sensores del exterior e interior en contacto con las probetas.....	83
Figura 4-33 ΔT entre los sensores del exterior en contacto con las probetas y el sensor de referencia .	83
Figura ANEXO X-1 Probetas con hormigón de muestra (sin PCM).....	122
Figura ANEXO X-2 Probetas con acetato de sodio (de arriba a abajo: 1, 2 y 3%).....	122
Figura ANEXO X-3 Probetas con zinc nitrato (de arriba a abajo: 1, 2 y 3%).....	123
Figura ANEXO X-4 Probetas con sodio tiosulfato (de arriba a abajo: 1, 2 y 3%).....	123

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Características de los PCM orgánicos [1].....	12
Tabla 2-2 Características de las parafinas (Elaboración propia basada en [8])	13
Tabla 2-3 Ventajas e inconvenientes de los PCM inorgánicos [1]	14
Tabla 2-4 Características de las sales hidratadas y materiales metálicos (Elaboración propia basada en [8]).....	15
Tabla 2-5 Comparación de materiales orgánicos e inorgánicos [9].....	15
Tabla 3-1 Características del poliestireno extruido [27].....	27
Tabla 3-2 Características de los PCM empleados.....	30
Tabla 3-3 Normas UNE utilizadas consultadas durante el trabajo	33
Tabla 3-4 Normas ASTM consultadas durante el trabajo.....	33
Tabla 3-5 Resistencia del cemento 32.5N [36]	36
Tabla 3-6 Resistencia del hormigón dependiendo de la edad [36]	37
Tabla 3-7 Dosificaciones propuestas	37
Tabla 3-8 Resultados de los primeros ensayos	38
Tabla 3-9 Resistencia a compresión a las 24 horas de las probetas grandes	39
Tabla 3-10 Cuadro resumen de las probetas grandes con las diferentes dosificaciones.....	40
Tabla 3-11 Dosificaciones finales incluyendo PCM.....	42
Tabla 3-12 Dimensiones de las probetas realizadas.....	46
Tabla 3-13 Cantidades PCM para medición de la temperatura de cambio de fase.....	47
Tabla 3-14 Relación entre dureza y resistencia a compresión	50
Tabla 4-1 Resultados curvas calorimétricas.....	59
Tabla 4-2 Temperaturas de solidificación de los PCM.....	64
Tabla 4-3 Temperaturas de fusión de los PCM.....	65
Tabla 4-4 Ensayos a compresión a los 4 días.....	66
Tabla 4-5 Ensayos a compresión a los 7 días.....	67
Tabla 4-6 Ensayos a compresión a los 14 días.....	68
Tabla 4-7 Ensayos a compresión a los 21 días.....	69
Tabla 4-8 Ensayos a compresión a los 28 días.....	70
Tabla 4-9 Resultados ensayos probetas grandes	75
Tabla 4-10 Resultados ensayos de dureza.....	76
Tabla 4-11 Parámetros térmicos	84
Tabla 4-12 Resultados parámetros térmicos	85
Tabla A3-1 Comparativa de propiedades de los diferentes grupos de PCM [8].....	96

Tabla A3-2 Características térmicas de algunos ácidos grasos [1].....	96
Tabla A3-3 Propiedades térmicas de las parafinas [8].....	97
Tabla A3-4 Propiedades térmicas de los compuestos orgánicos no parafínicos [8].....	99
Tabla A3-5 Propiedades térmicas de las sales inorgánicas hidratadas [8].....	101
Tabla A3-6 Propiedades térmicas de los PCM eutécticos [8].....	103

NOMENCLATURAS

ABREVIATURAS

T_f	Temperatura de fusión (°C)
ΔH_f	Entalpía de fusión (J/g)
D	Densidad (Kg/m ³)
m	Masa (Kg)
V	Volumen (m ³)
f_c	Resistencia a compresión (MPa)
F	Carga máxima alcanzada (kN)
A_c	Área transversal
q	Flujo de calor
C_p	Capacidad calorífica (J/K)
ΔT	Variación de temperatura (K)
t	Tiempo (s)
Q	Cantidad de calor (J)
C_e	Calor específico (J/kg·K)
λ	Conductividad térmica (W/m·K)
R	Resistencia térmica (m ² ·K/W)

SIGLAS

TFG	Trabajo fin de grado
UE	Unión Europea
PCM	Materiales de cambio de fase
LHS	Almacenamiento de calor latente
TES	Almacenamiento de energía térmica
ACV	Análisis de ciclo de vida
IDAE	Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía
ENM	Escuela Naval Militar
DTA	Análisis Térmico Diferencial
DSC	Calorimetría diferencial de barrido

AF	Alférez de fragata
N.O.	No observado
HM	Hormigón de muestra

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Presentación

El gran incremento en el consumo de los recursos energéticos durante el último siglo nos ha conducido a una situación de insostenibilidad. De no cambiar la tendencia actual, los problemas derivados de esta sobreexplotación de los recursos pueden verse agravados en un futuro a corto o medio plazo con consecuencias catastróficas. Por todo ello, la investigación y, quizás el factor más importante, la concienciación de la sociedad de la necesidad de buscar una mejora de la eficiencia energética (*Figura 1-1*) se hacen cada vez más necesarios.



Figura 1-1 Escala de la calificación energética [55]

Esta introducción pretende resaltar la importancia de la eficiencia energética, y en especial en edificaciones y construcciones, realizando a continuación un breve análisis de lo que supone el ahorro en este aspecto. En relación a esto, destacan algunas técnicas para reducir dichas demandas energéticas como puede ser el empleo de materiales de cambio de fase (PCM). De la misma forma, se describen los objetivos que se persiguen con la realización de este trabajo de fin de grado y se indica la organización del presente documento.

1.2 Panorama energético: demanda y eficiencia

Como se ha comentado anteriormente, el abuso en el empleo de los recursos naturales y más concretamente de los energéticos, ha provocado un fuerte impacto de la acción del hombre en la naturaleza, ocasionando problemas como el incremento de gases contaminantes en la atmósfera, lluvia ácida, etc. La limitación de los combustibles fósiles cada vez más escasos y difíciles de conseguir, ha provocado también un importante crecimiento de los precios de los recursos energéticos. Toda esta problemática surge como consecuencia del incremento del consumo de energía por parte de países industrializados y potencias emergentes.

A continuación, se exponen una serie de datos obtenidos de [1], que proporcionan una idea sobre el incremento de la demanda de energía actual:

- *“El consumo se ha multiplicado por 100 desde la era industrial y crece a un ritmo promedio del orden del 2,3% anual”*
- *“La potencia total necesaria es del orden de 10 TW, siendo el consumo energético promedio de 2,3 kW/persona”*
- *“El consumo de energía en edificios representa un 40% del consumo total en la Unión Europea (UE)”*
- *“Alrededor del 80% de la energía que se consume en la UE procede de combustibles fósiles. La dependencia del petróleo y del gas importado, que en la actualidad se sitúa en torno al 50%, podría elevarse al 70% en 2030”*

Durante las últimas décadas la sociedad ha comenzado a experimentar un proceso de concienciación sobre la necesidad de buscar el equilibrio entre la calidad de vida y el consumo de los recursos naturales. Todo ello ha provocado que diferentes organismos y gobiernos impulsen nuevas políticas con medidas que buscan un aumento del uso de las energías renovables y de las medidas de ahorro y eficiencia energética. Con esto se pretende alcanzar un equilibrio medioambiental y conseguir una autosuficiencia energética por parte de los países. En relación al primer aspecto, es destacable el esfuerzo en I+D+i que están realizando todos los países, destinando grandes partidas presupuestarias para programas de energía y cambio climático. Es en este punto donde los PCM han conseguido hacerse un hueco. Su investigación ha permitido avances en materia de eficiencia energética. Con respecto al segundo, y por citar un ejemplo, la dependencia energética del exterior de España se sitúa entre un 70 y un 75%, siendo 20 puntos superior a la media europea. En la *Figura 1-2* se puede observar una evolución histórica de la dependencia energética de España hasta el año 2015:

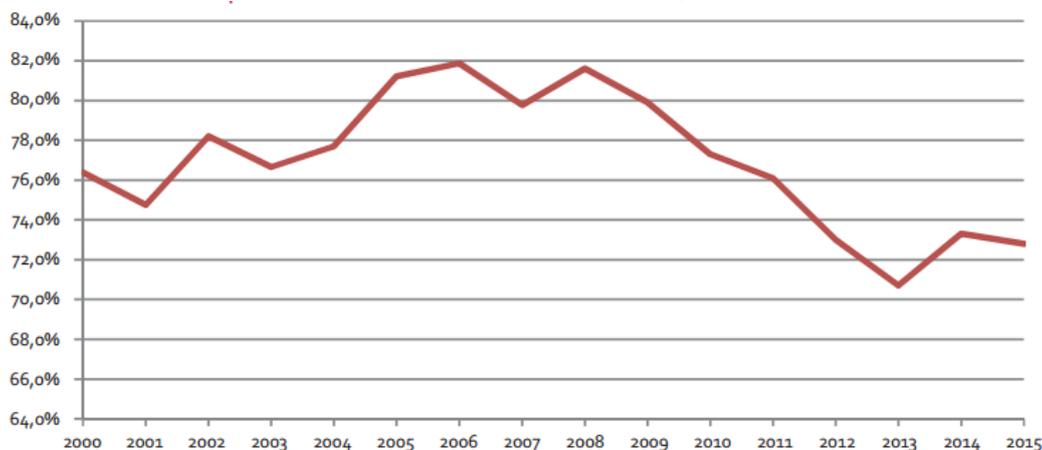


Figura 1-2 Evolución de la dependencia energética [53]

El panorama energético nacional muestra que mayoritariamente la energía consumida proviene de fuentes no renovables como el petróleo o el gas. Además, España tiene una fuerte dependencia energética exterior (*Figura 1-2*) [2]. Los compromisos medioambientales a los que el país se ha suscrito y las imposiciones de la Unión Europea en esta materia provocan que sea necesario replantear el sector energético en nuestro país. El Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) es el organismo nacional encargado de la consecución de los objetivos adquiridos por España en materia de mejora de la eficiencia energética y energías renovables [3]. En el siguiente gráfico, se muestran los datos referentes a los diversos tipos de fuentes de los que procede la energía consumida en España durante el año 2015:

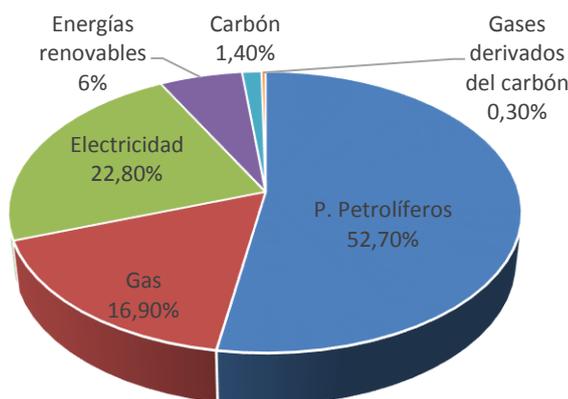


Figura 1-3 Consumo de energía en España durante el año 2015 (Elaboración propia basado en [54])

1.2.1 Eficiencia energética en construcciones

“En Europa, el 42% del consumo de energía y el 35% de las emisiones de gases de efecto invernadero se deben a los edificios” [4]

En relación con el consumo energético, un aspecto muy importante a destacar es la gran demanda que exige el sector de la construcción y que se estima sobre un 40% [5]. Son las viviendas y los edificios comerciales los que mayores demandas de energía exigen y los que mayores emisiones contaminantes realizan a la atmósfera por el empleo de sistemas de climatización. La frase del comienzo de este apartado da una idea de las cantidades de las que se están hablando. Según datos del IDAE del año 2011, entre el 41 y el 56% de la energía consumida en los hogares españoles se destinó a sistemas de climatización [6]. Las nuevas políticas implementadas en edificación han originado numerosas investigaciones para reducir dicho consumo energético, y por consiguiente la demanda exterior de energía.

El concepto de eficiencia energética en edificación se entiende como la cantidad de energía consumida o que se estima necesaria para satisfacer las diferentes necesidades asociadas. La normativa nacional se basa en la transposición de las directrices europeas recogidas en la Directiva Europea de Eficiencia Energética en la Edificación (2010/31/UE). Dicha normativa energética exige la certificación de los edificios y la limitación de su demanda, además de incorporar energías renovables y/u otros sistemas que contribuyan a la eficiencia [6].

El ahorro energético de una edificación depende tanto del usuario como de la propia instalación en sí, que se ve afectada por su situación geográfica y por la envolvente propia del edificio (ventanas, fachada, etc.) [6]. Otro aspecto a considerar es la climatización, que se realizará siguiendo las características y condiciones a cumplir, y previo conocimiento de las necesidades energéticas.

Conviene destacar la investigación y el desarrollo de sistemas de almacenamiento de energía térmica (Thermal Energy Storage, TES), que adaptan los períodos y cantidades de suministro de energía a los

de demanda real. El uso de sistemas TES nos permite reutilizar los excedentes térmicos y moderar la demanda eléctrica [1]. Como parte de estos sistemas, destacan los materiales de cambio de fase, conocidos en inglés como Phase Change Materials (PCM), que los cuales han sido mencionados anteriormente. Son utilizados como elementos de almacenamiento térmico para mejorar la eficiencia energética y reducir el consumo. Estos materiales suavizan las oscilaciones de las temperaturas interiores, manteniendo el confort térmico de las instalaciones. Sin embargo, su empleo puede llevar asociado ciertos problemas como pueden ser una disminución de la resistencia estructural o modificaciones de ciertas propiedades. De esta forma, se hace necesario garantizar la estabilidad de los materiales durante su vida útil y su bajo coste, además de determinar las propiedades de dichos materiales en función de la temperatura [2].

Como se ha comentado anteriormente, los PCM pueden constituir una forma efectiva para reducir la dependencia de los sistemas de climatización. Según el estudio [7], para el año 2020 las emisiones de CO₂ podrían verse reducidas un 3,43% mediante la aplicación de los PCM en edificación.

1.3 Motivación y objetivos del TFG

La motivación principal de este trabajo de fin de grado es realizar un estudio sobre la incorporación de PCM en elementos constructivos, en especial el hormigón. Como se ha mencionado anteriormente, los PCM constituyen una forma de almacenamiento de energía térmica que puede conllevar una importante reducción de la demanda energética y de los costes de una edificación. Sin embargo, su empleo puede acarrear la modificación de las propiedades de los elementos haciéndolos incompatibles con el propósito final de dicho elemento.

Con este trabajo se pretende estudiar la mejora de las prestaciones térmicas del hormigón al adicionarse PCM pero sin que sus propiedades físicas y mecánicas se vean mermadas, con la consiguiente mejora de la eficiencia energética de la construcción. La validación de los resultados obtenidos se realizará mediante estudios previos de las propiedades de las probetas a realizar.

Para la consecución del objetivo principal, se plantean una serie de objetivos específicos:

- Investigar sobre los sistemas de almacenamiento de energía térmica y su aplicación en edificación.
- Profundizar en los materiales de cambio de fase, en concreto en los empleados en edificación, mediante el estudio de sus características, propiedades y aplicaciones.
- Estudiar el hormigón como elemento constructivo.
- Caracterizar los PCM mediante el estudio de las propiedades térmicas, para realizar la elección del más adecuado de los propuestos.
- Caracterizar de forma experimental la dosificación de hormigón que más resistencia a compresión y dureza soporte de entre todas las propuestas para cumplir con la normativa vigente.
- Estudiar experimentalmente el comportamiento térmico y las propiedades mecánicas de las probetas de hormigón con distintos PCM y distintas concentraciones del mismo para comprobar su contribución al ahorro energético.

1.4 Organización de la memoria

Una vez contextualizado este trabajo y planteado los objetivos del mismo, se describe la organización del mismo. El trabajo está constituido por seis capítulos, complementados por varios anexos.

En el Capítulo 1 se realiza una breve descripción del contexto energético, abordando la necesidad de mejorar la eficiencia en edificaciones. Se completa con la incorporación de las razones que lo han motivado, los objetivos planteados y la descripción de la organización del trabajo.

En el Capítulo 2 se revisa el estado del arte comenzando con una breve introducción sobre los diferentes sistemas de almacenamiento de energía térmica, profundizando en aquellos más importantes. También se expone una breve reseña histórica acerca de los materiales de cambio de fase, sus características, su clasificación y sus diversas aplicaciones. Por último, se habla sobre la incorporación de los PCM en elementos constructivos de forma general y en el hormigón de forma particular.

En el Capítulo 3 se desarrolla el proyecto en sí, explicando una serie de pasos previos que se realizaron antes de ejecutar el proyecto. También, se explica cómo ha sido el proceso de elaboración de las probetas y los posteriores experimentos realizados.

En el Capítulo 4 se muestran y analizan los resultados obtenidos, buscando posibles soluciones y propuestas de mejora a las dificultades encontradas.

En el Capítulo 5 se realiza una revisión de los objetivos propuestos y se exponen las conclusiones obtenidas. Además, se plantean las posibles líneas de trabajo a desarrollar en un futuro.

En el Capítulo 6 se reflejan todas las referencias bibliográficas consultadas para el desarrollo de este trabajo.

Por último, se adjuntan algunos anexos, que incluyen información complementaria no expuesta en la memoria por su extensión, como puede ser una relación de siglas y acrónimos empleados, tablas y fichas técnicas, etc.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Introducción

En este apartado del trabajo se pretende abordar las diferentes formas de almacenamiento de energía, así como realizar una revisión de la documentación existente sobre los materiales de cambio de fase y su incorporación en elementos constructivos, concretamente, en el hormigón.

2.2 Formas de almacenamiento de energía térmica

Ante el continuo incremento en el precio de las fuentes de energía fósil de nuestro planeta y los problemas derivados actualmente de la implantación y empleo de energías renovables, se abre la interesante vía de la investigación y optimización de los recursos energéticos disponibles.

En relación a esto, los sistemas de almacenamiento de energía térmica (Thermal Energy Storage, TES) han cobrado gran importancia ya que permite adaptar los períodos de suministro a los de demanda energética, lo cual crea un campo de investigación para la mejora de la eficiencia energética [1]. Estos sistemas se puede clasificar, de forma genérica, en función de ciertas propiedades del material empleado: [8]:

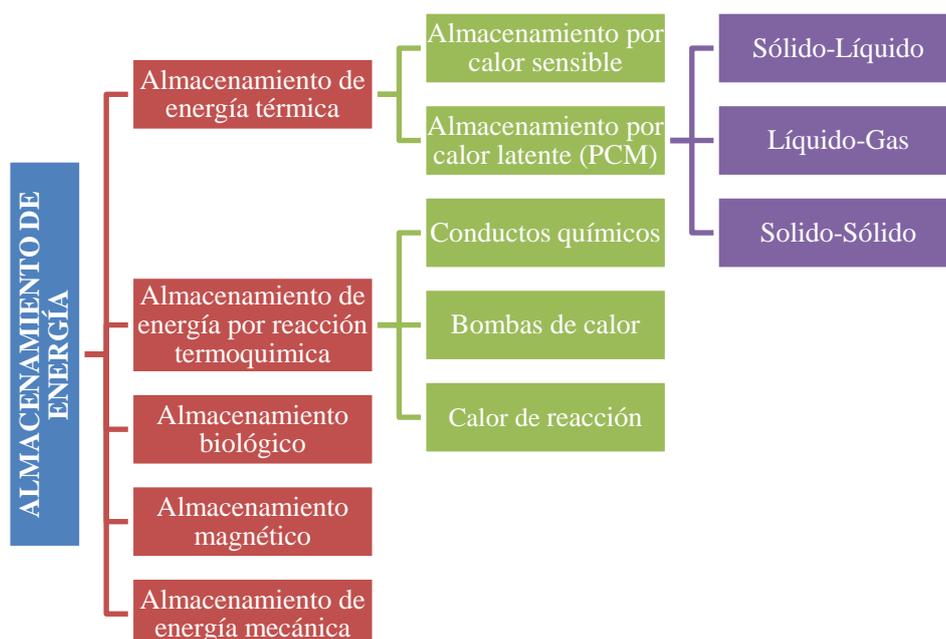


Figura 2-1 Formas de almacenamiento de energía

Como se tratará posteriormente, los materiales de cambio de fase están incluidos en la forma de almacenamiento de energía térmica por calor latente.

El empleo del almacenamiento térmico tiene múltiples ventajas como es la posibilidad de conservar la energía sobrante de otras fuentes y suavizar los picos y los valles de demanda energética. Todo esto es aplicable a sistemas de climatización tanto calefacción como refrigeración, posibilitando una mejora en el rendimiento del sistema, con el consiguiente ahorro energético [9].

A continuación se definen los principales tipos de almacenamiento de energía siendo estos el de energía térmica y el de reacción termoquímica [1, 2, 5, 8, 10].

- **Almacenamiento por calor sensible**

En esta forma de almacenamiento, la sustancia empleada absorbe o libera energía mediante un aumento o disminución de su temperatura, sin llegar a realizar un cambio de estado como se puede apreciar en la *Figura 2-2*. El calor sensible es directamente proporcional a la diferencia de temperatura a la que es sometido el cuerpo. Los principales tipos de almacenamiento por calor sensible son empleando cavidades subterráneas (acuíferos, perforaciones, etc.), tanques de aguas exteriores y lechos de grava.

La sustancia más empleada es el agua por las numerosas ventajas que implica como son la fácil disponibilidad, no toxicidad, bajo coste, elevada capacidad de almacenamiento y conductibilidad de energía. También se emplean materiales pétreos cuando es el aire el encargado del transporte del calor.

Con respecto a las desventajas, al aumentar la temperatura con la cantidad de energía térmica almacenada, aumentan las pérdidas energéticas. Para evitar esto, se debe aislar adecuadamente el recipiente del material empleado, lo que supone un aumento de los costes.

- **Almacenamiento por calor latente**

Se denomina calor latente a la energía que absorbe o cede una sustancia cuando se somete a un cambio de fase, de estructura molecular o de estado de hidratación. Durante la transformación de la estructura molecular del material para el cambio de fase, la temperatura se mantiene constante como puede observarse en la siguiente figura:

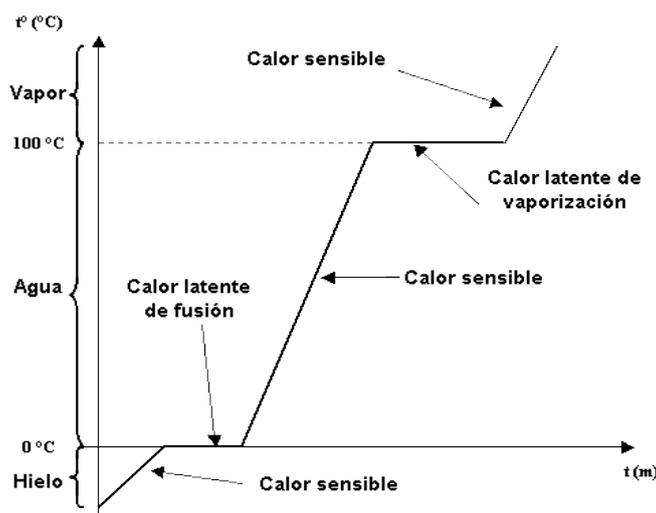


Figura 2-2 Gráfica calor latente y calor sensible [56]

Esta forma de almacenamiento presenta una serie de ventajas frente a los otros tipos como es la gran densidad de almacenamiento, la reducción de las pérdidas energéticas derivadas de la variación de la temperatura, posibilidad de selección de la temperatura de trabajo y los cambios de estado se producen a temperatura constante. El cambio de líquido a gas no se emplea normalmente en almacenamiento térmico, ya que las variaciones de volumen al cambiar de fase son demasiado grandes.

- **Almacenamiento por reacción química**

Esta forma de almacenamiento se basa en la energía liberada y absorbida en los procesos de ruptura y de unión de los enlaces moleculares en una reacción química reversible. El calor almacenado depende de la cantidad de material, el calor endotérmico de la reacción, y el grado de conversión [8].

Pueden almacenar hasta 350 kWh/m³ dependiendo de la reacción, aunque para ello necesitan altas temperaturas (130°C). Estos sistemas destacan por su flexibilidad, aunque como contrapartida son más complejos comparados con otros [1].

Entre las reacciones llevadas a cabo destacan la de utilizar una sal y agua y la absorción del vapor de agua en una zeolita (silicatos de aluminio).

2.3 Materiales de cambio de fase

2.3.1 Generalidades

Los materiales de cambio de fase son sustancias que experimentan un cambio de estado mediante la aplicación de energía térmica sobre ellos a una determinada temperatura según el material y su calor latente. Dicha temperatura se mantiene constante durante la absorción de energía, siendo liberada una vez se requiera de su uso [1].

El uso de PCM se remonta al primer tercio del siglo pasado, pero no es hasta los años 70 cuando se produce un importante desarrollo de los mismos. Desde el principio se diseñaron y estudiaron diferentes PCM con diversas propiedades físicas, químicas y térmicas para satisfacer la variedad de usos y aplicaciones [5, 6]. A continuación se detallan algunos de los hitos más importantes respecto a estos:

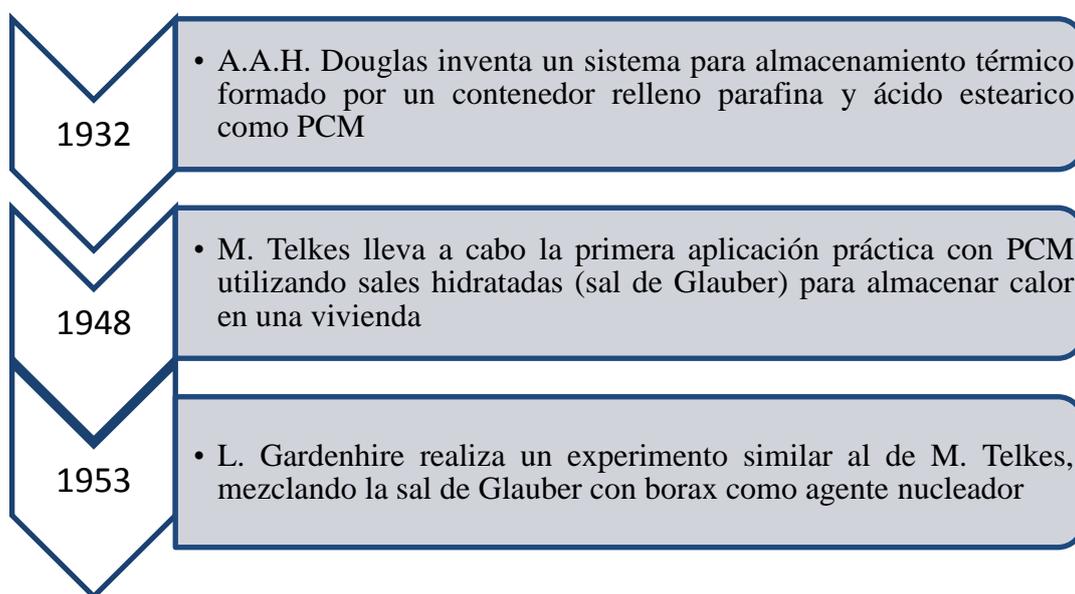


Figura 2-3 Breve reseña histórica (elaboración propia basada en [5])

A pesar de todos los avances desarrollados, los experimentos no satisfacían los requisitos que se intentaban. No obstante, se continuó la investigación sobre estos materiales, y prueba de ello fue su uso para almacenamiento térmico de un vehículo lunar en la misión Apollo 15. No sería hasta finales del siglo XX cuando los PCM se desarrollen plenamente y surjan nuevos campos de aplicación.

2.3.2 Principales características

Los materiales de cambio de fase se encuadran dentro de los sistemas de almacenamiento por calor latente, siendo esta una de las formas más eficientes de almacenamiento térmico. El PCM experimenta un cambio de estado a una temperatura determinada, usando su calor latente como acumulador térmico [5]. El empleo de este sistema de almacenamiento supone ciertas ventajas con respecto a los otros sistemas en edificación [8]:

- Elevada densidad de almacenamiento energético, siendo muy superior a la de los materiales que emplean el calor sensible.
- Las pérdidas energéticas no aumentan, al no hacerlo la temperatura con el almacenamiento térmico, manteniendo unos niveles aceptables.
- No requiere grandes inversiones o la ejecución de grandes instalaciones e infraestructuras para su empleo en edificación.
- La temperatura de trabajo necesaria, dentro del rango de temperaturas utilizado en edificación (20-30°C), queda fijada al seleccionar el material con la temperatura requerida.

El almacenamiento de calor latente PCM se lleva a cabo a través de los siguientes cambios de estado en ambos sentidos, siendo únicamente viable el de sólido-líquido:



Figura 2-4 Características de los cambios de estado (elaboración propia basado en [1, 5, 8])

Como se mencionó en párrafos anteriores, los PCM mantienen constante su temperatura durante el cambio de fase mientras que el material almacena o cede energía (en las mezclas es un rango en torno a dicha temperatura). Este hecho supone una mayor densidad energética de estos materiales en comparación con cualquier otro [1].

Un aspecto positivo a destacar en su empleo es la menor temperatura a la cual se acumula la energía, consiguiendo por lo tanto unas pérdidas menores [1]. Para aplicaciones constructivas, el rango de temperaturas de los materiales de cambio de fase empleados oscila entre los 5°C y los 35°C aproximadamente [11].

A continuación se detallan las propiedades más requeridas en base a [8, 12, 13, 14]:

➤ **Propiedades termofísicas**

- Alta densidad.
- Alto calor específico.
- Temperatura de fusión (T_f) en el rango de funcionamiento según la aplicación.
- Alto calor latente de fusión (ΔH_f) por unidad de volumen.
- Baja variación de volumen en el cambio de fase.
- Baja presión de vapor a la temperatura de funcionamiento.
- Buena transferencia de calor con alta conductividad térmica en fase sólida y líquida.

➤ **Nucleación y crecimiento de los cristales**

- Tasa de nucleación alta para evitar el subenfriamiento de la fase líquida durante la solidificación.
- Alta tasa de crecimiento de cristales, para que el sistema pueda satisfacer la demanda de recuperación de calor del sistema de almacenamiento.

➤ **Propiedades químicas**

- No tóxico.
- No inflamable.
- No explosivo.
- No corrosivo para los materiales encapsulados.
- Ciclo de solidificación/fusión reversible y completo.
- Baja degradación después de un elevado número de ciclos de fusión/solidificación.

➤ **Económicas**

- Rentable.
- Abundante y disponible.
- Fácil reciclaje y tratamiento.
- Buen comportamiento ambiental.

2.3.3 Clasificación

Existe una gran variedad de PCM con una enorme gama de puntos de fusión-solidificación. Los materiales de cambio de fase liquido-sólido más comunes en el rango de temperaturas 20°C y 80°C son las ceras de parafina, sales hidratadas, mezclas eutécticas y ácidos grasos [5]. En la *Figura 2-5* se presenta una posible clasificación de los materiales de cambio de fase, centrada solo en el cambio de solido-líquido por ser el más viable:

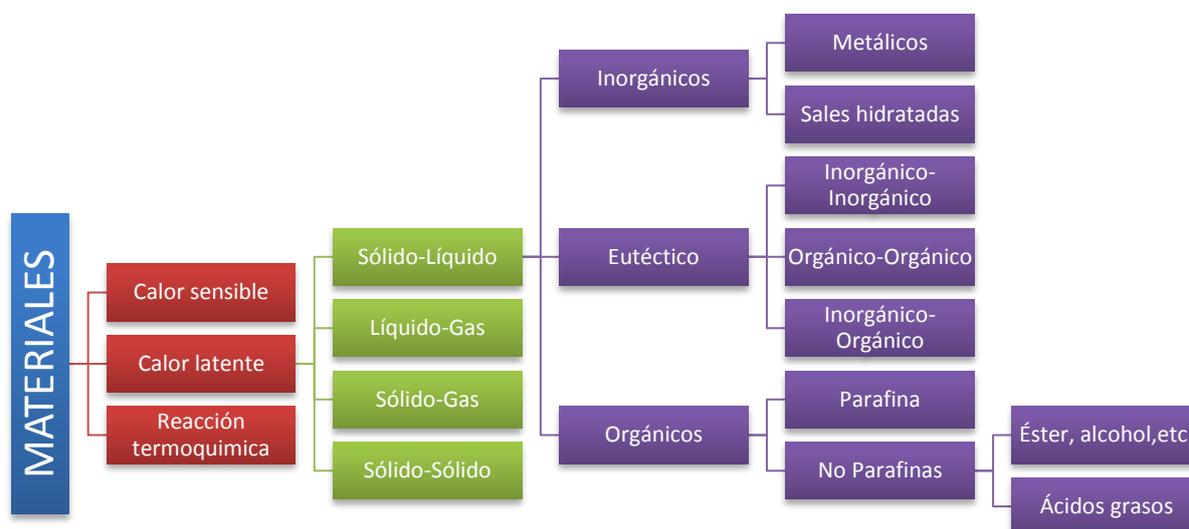


Figura 2-5 Clasificación de materiales de cambio de fase (Elaboración propia basada en [7, 49])

Los materiales orgánicos poseen una mayor estabilidad química y fusión congruente, es decir, pueden cambiar de estado sólido-líquido repetidamente sin segregación de fases y la consiguiente degradación de su calor latente de fusión. Por lo general, no son corrosivos con el recipiente que los contiene y cristalizan con poco o ningún subenfriamiento [8]. En la siguiente tabla se muestra un resumen de las ventajas e inconvenientes de su empleo:

VENTAJAS	INCONVENIENTES
Fáciles de usar	Calor latente y entalpía más bajos
Estabilidad térmica y química	Baja conductividad térmica
No sufren subenfriamiento	Amplio rango de fusión
No necesitan agente nucleador para solidificar	Grandes cambios de volumen durante el cambio de fase
No corrosivos	Reacción potencial con hormigón
Reciclables y ecológicamente inocuos	Potencialmente inflamables
	Más caros

Tabla 2-1 Características de los PCM orgánicos [1]

Como se representa en la *Figura 2-5*, los materiales orgánicos se clasifican en parafínicos y no parafínicos.

- La cera de parafina consiste en una mezcla de cadena lineal de n alcanos $CH_3-(CH_2)_n-CH_3$, cuya cristalización libera una gran cantidad de calor latente [8]. Cuanto mayor sea la longitud de la cadena, mayor será la temperatura de fusión y el valor latente. En la *Tabla 2-2* se muestran las características más típicas de las ceras de parafina:

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Baja presión de vapor en forma fundida	Baja conductividad térmica
Amplia gama de temperaturas	Moderadamente inflamables
Inertes químicamente	No compatibles con recipientes de plástico
Pequeños cambios de volumen en fusión	
Estables por debajo de los 500°C	

Tabla 2-2 Características de las parafinas (Elaboración propia basada en [8])

Las desventajas pueden ser parcialmente eliminadas mediante la encapsulación de la cera. En la *Tabla A3-3* se muestran los valores característicos de las parafinas empleadas actualmente.

- Los materiales orgánicos no parafínicos son los más numerosos entre los materiales de cambio de fase, teniendo cada uno sus características propias y propiedades muy variadas [8]. Presentan las características comunes a los materiales orgánicos descritas en la *Tabla 2-1*, además de variado nivel de toxicidad e inestabilidad a altas temperaturas. En la *Tabla A3-4* se muestran las características de algunos materiales orgánicos no parafínicos. Los ácidos grasos, derivados de productos animales y vegetales, tienen valores de calor de fusión altos comparados a los de parafina. El principal inconveniente es su coste, siendo este del orden de 2 a 2.5 veces mayor que el de las parafina [1].

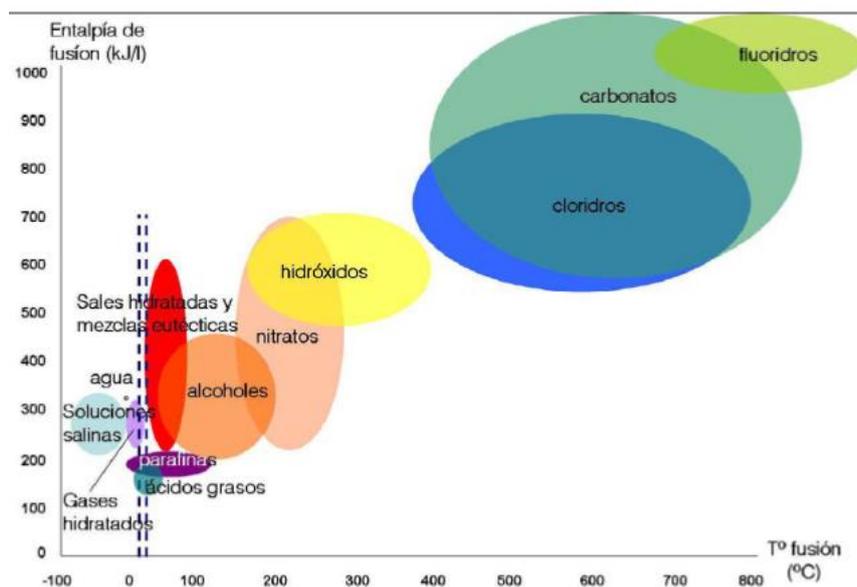


Figura 2-6 Entalpía de fusión frente a la temperatura de fusión de los diferentes tipos de PCM [50]

En las mezclas eutécticas intervienen dos o más componentes con punto de fusión y solidificación más bajo que el que poseen los compuestos individualmente formando una mezcla de los cristales durante la cristalización [8]. Esto hace que la mezcla alcance un punto de congelación más bajo, y ambos se solidifiquen a esa temperatura eutéctica [1]. Como se muestra en la *Figura 2-5* las mezclas eutécticas se dividen en tres tipos según se mezcle una sustancia inorgánica con otra inorgánica, una sustancia orgánica con otra orgánica y una sustancia inorgánica con una orgánica. En la *Tabla A3-6* se muestran las características de algunas mezclas eutécticas.

Los materiales inorgánicos de cambio de fase, se clasifican como sales hidratadas y metálicos como se puede observar en la *Figura 2-5*. En un principio, fueron los más estudiados debido a su bajo coste y su capacidad de almacenamiento de grandes cantidades de calor por unidad de volumen [1]. Con respecto a sus características generales, se puede destacar que no son inflamables, presentan alta conductividad térmica, son corrosivos para la mayoría de los metales y sufren descomposición y subenfriamiento [13]. Esto último provoca que necesiten un contenedor o cápsula para utilizarlos como aditivos de otros materiales. Estos PCM no tienen una T_f marcada y sus ΔH_f no sufren variaciones importantes con un número elevado de ciclos [1]. En la *Tabla 2-3* se muestra un resumen de las ventajas e inconvenientes de los PCM inorgánicos:

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Generalmente baratos	Corrosivos para la mayoría de metales
No inflamables	Su uso prolongado necesita de aditivos
Densidad de almacenamiento térmico elevada	Son susceptibles de subenfriamiento
Elevada conductividad térmica	El encapsulado y preparación para su uso ocasionan algunos problemas*
Reciclables y biodegradables	Los aditivos utilizados para evitar una fusión incongruente reducen su capacidad de almacenamiento latente por unidad de volumen en más de un 25%

Tabla 2-3 Ventajas e inconvenientes de los PCM inorgánicos [1]

*Las sales hidratadas absorben agua fácilmente y necesitan un encapsulado semipermeable.

A continuación se procederá a explicar cada uno de los tipos en los que se divide las sustancias inorgánicas de acuerdo con la distribución realizada en la *Figura 2-5*:

- Las sales hidratadas son compuestos formados por sales inorgánicas y agua generando un sólido cristalino típico de fórmula general $AB \cdot nH_2O$. Destacan por su bajo coste, fácil disponibilidad, tener un punto de fusión definido y mayor conductividad que otros compuestos. Sin embargo, presentan una serie de inconvenientes como son la separación de fases y el subenfriamiento. Con respecto al primero de los problemas descritos, se produce al formarse otras sales durante la fusión de las sales hidratadas pero puede ser eliminado en cierta medida mediante la adicción de mezclas espesantes. Con respecto al segundo, el subenfriamiento provoca que la mezcla empieza a cristalizar en un punto de solidificación diferente al especificado pero puede ser solucionado añadiendo un agente de nucleación, que proporciona el núcleo con que se inicia la formación de cristal [8]. Las sales hidratadas son los PCM que más estudios han originado para uso en sistemas de almacenamiento de energía térmica de calor latente y las que utilizaremos en el laboratorio para el desarrollo de este trabajo. Las propiedades más destacables se han reflejado en la

Tabla 2-4. En la *Tabla A3-5* se muestran las características de algunas sales inorgánicas hidratadas.

- Los materiales metálicos, ya sean puros o aleaciones, no suelen emplearse como PCM debido al inconveniente del peso. Sin embargo, cuando lo que interesa es el volumen, son buenos candidatos a causa de la alta temperatura de fusión por unidad de volumen [8]. Las propiedades más destacables se han reflejado en la *Tabla 2-4*.

SALES HIDRATADAS	MATERIALES METÁLICOS
Alto calor latente de fusión por unidad de volumen	Bajo calor de fusión por unidad de peso.
Compatible con los plásticos	Bajo calor específico.
Ligeramente tóxicos	Relativamente baja presión de vapor.
Conductividad térmica alta	Alto calor de fusión por unidad de volumen.
Pequeños cambios de volumen en la fusión	Alta conductividad térmica.
No son muy corrosivos	
Bajo coste	

Tabla 2-4 Características de las sales hidratadas y materiales metálicos (Elaboración propia basada en [8]).

A modo resumen, la siguiente tabla realiza una comparativa entre los materiales orgánicos e inorgánicos:

ORGÁNICOS	INORGÁNICOS
<u>Ventajas</u>	
No corrosivos	Superior entalpía de cambio de fase
Inexistente subenfriamiento	No inflamables
Estabilidad térmica y química	
<u>Desventajas</u>	
Menor entalpía de cambio de fase	Subenfriamiento
Baja conductividad térmica	Corrosivos
Inflamable	Separación de fases
	Segregación de fases y carece de estabilidad térmica

Tabla 2-5 Comparación de materiales orgánicos e inorgánicos [9]

En la *Tabla A3-1* se muestra un cuadro resumen con todo lo comentado en este apartado.

2.3.4 Aplicaciones

Debido a las numerosas ventajas que presenta el empleo de los PCM, el campo de aplicación de los mismos es amplio y diverso. Algunos de estos ejemplos son la electrónica, sistemas de climatización, transporte de mercancías sensibles a los cambios de temperatura, botánica, industria alimenticia, textil, etc. [1]. Con respecto a la industria alimenticia, se emplean en recipientes que regulan la temperatura de los alimentos, como por ejemplo en el transporte de pescado. Actualmente una de las principales líneas de investigación la constituye el sector textil (*Figura 2-7*). En este caso, la función del PCM es actuar como un regulador térmico que absorbe el exceso de calor corporal y lo libera cuando sea necesario. Entre las marcas comerciales que lo emplean destacan Outlast, Thermabsorb, ConforTemp e Interactive.

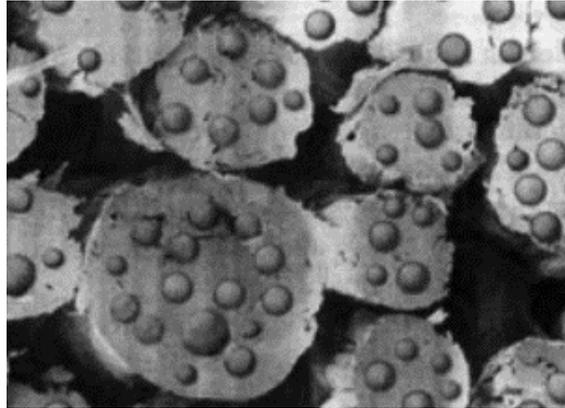


Figura 2-7 PCM incorporado en fibras textiles [51]

Pero probablemente el sector donde más interesante resulte su aplicación sea en el de la edificación. La combinación de este tipo de material con yeso, hormigón u otros materiales cerámicos permite incrementar la capacidad de almacenamiento térmico, y con ello disminuir los cambios de temperatura en los espacios internos de las edificaciones, manteniendo dicha temperatura dentro del margen del confort humano y mejorando la eficiencia energética. Pueden formar parte de revestimientos o de la estructura de la edificación [11]. Algunos ejemplos de aplicación de los PCM que se están estudiando actualmente es su aplicación en las grandes cristalerías de edificios, creando una capa de dicho material entre dos cristales [8] o su incorporación a los paneles sándwich, aumentando su inercia térmica y solucionando los problemas de sobrecalentamiento en construcciones ligeras. Con respecto a su aplicación en sistemas de climatización (*Figura 2-8*), destacan por su uso en sistemas de calefacción/refrigeración por suelo radiante o mejorando los sistemas de ventilación nocturna, los cuales aprovechan el descenso térmico durante la noche para almacenar dicha energía y emplearla en el enfriamiento del aire durante el día [9]. En este ámbito destacan empresas como BASF, Mitsubishi Chemical o Climotor, entre otras.

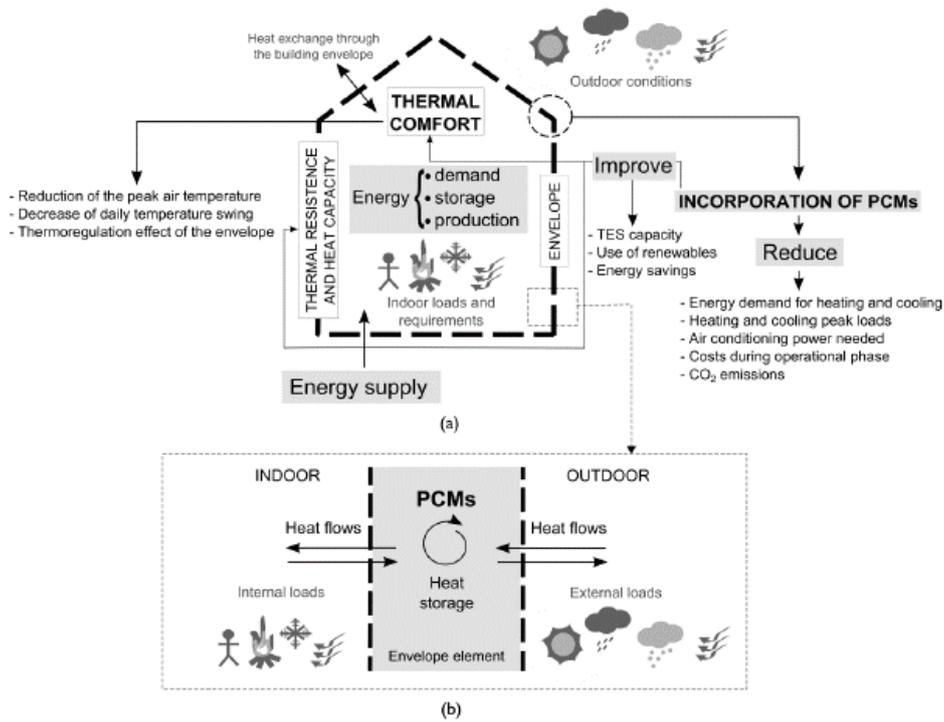


Figura 2-8 (a) Ventajas de los PCM como sistemas TES. (b) Esquema energético de un elemento con PCM [52]

2.4 PCM en edificación

2.4.1 Generalidades

La temperatura en espacios interiores de edificaciones está también influenciada por las condiciones ambientales que se den en el exterior y por las características térmicas de los materiales de construcción [9]. Con relación a esto, es conveniente definir la inercia térmica de un material. Brevemente, puede ser definida como la capacidad de una masa de conservar la energía térmica recibida y liberarla de forma progresiva posteriormente [15]. Dicha inercia permite el amortiguamiento de las variaciones de las temperaturas y el incremento del confort interior, pues se consigue retrasar las temperaturas máximas y mínimas y reducir también los picos de temperatura como se puede observar en la *Figura 2-9*.

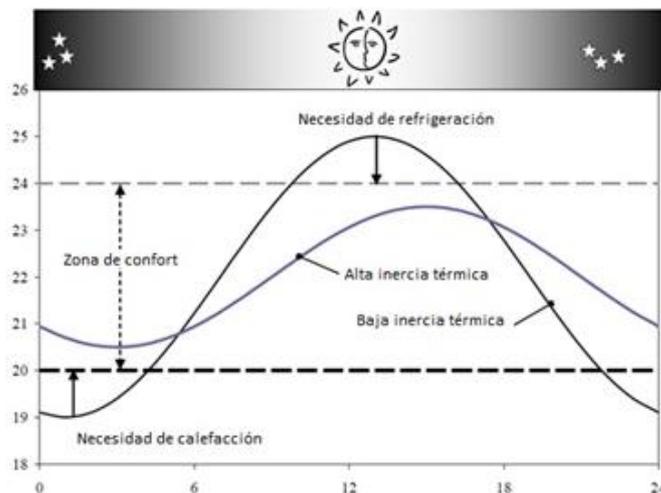


Figura 2-9 Atenuación de los picos de temperatura debido a la inercia térmica [15]

Un aumento de la inercia térmica lleva asociada una mejora de la eficiencia energética, ya que permite una reducción del dimensionado y consumo de los sistemas de climatización en las edificaciones. Sin embargo, dicho incremento conlleva también un aumento de masa o volumen de material del cerramiento. Por otro lado, la tendencia actual es la construcción de elementos de bajo peso, lo que lleva asociados materiales de baja capacidad calorífica [9], que provocarán un gran calentamiento durante el día y un gran enfriamiento por la noche [6]. Es en este punto donde los materiales de cambio de fase entran a formar parte como un elemento más a considerar, puesto que permiten el incremento de la inercia térmica sin aumentar la masa o el volumen [16].

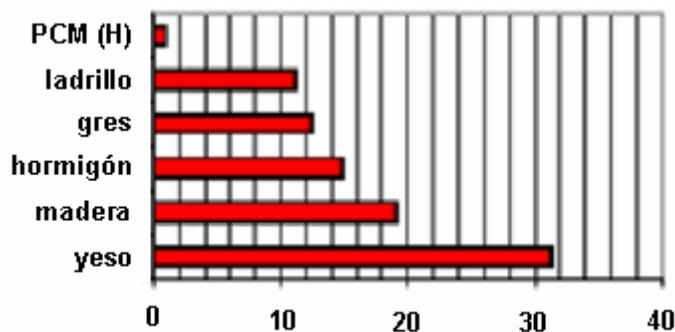


Figura 2-10 Comparativa del espesor (cm) requerido por diferentes materiales para mantener una misma inercia térmica [9]

De la *Figura 2-10* se puede extraer como conclusión la necesidad de una gran masa de hormigón para obtener la misma inercia térmica que si sólo se emplea el PCM. Esto supone una vía de estudio para conseguir cerramientos mucho más ligeros mediante la incorporación de dichos materiales.

En edificación, existen varias formas de incorporar los PCM a los elementos constructivos [1, 6, 8]: de forma directa, por inmersión o mediante el encapsulado.

En la incorporación directa, el material de cambio de fase se mezcla directamente con el material de construcción (yeso, hormigón,...) en el momento de su fabricación. La resistencia de los materiales puede verse afectada dependiendo de las composiciones y puede aumentar su inflamabilidad dependiendo del material que se utilice. Este aspecto será estudiado en este trabajo.

En la incorporación por inmersión, el material poroso se sumerge en PCM líquido para que lo absorba y rellene las cavidades y poros. Esta forma lleva asociados algunos inconvenientes como la variabilidad del tiempo de inmersión, posibilidad de fugas, etc.

En la incorporación por encapsulamiento, el PCM se contiene en un recipiente para que no origine problemas al reaccionar con otros elementos. Existen diferentes formas y tamaños de encapsular. En función de esto último, se pueden dividir en macroencapsulados (*Figura 2-12*) o microencapsulados (*Figura 2-11*). Los primeros se refieren a un encapsulamiento relativamente grande y se aplican, por ejemplo, entre bloques de hormigón o a revestimientos. Sin embargo presentan problemas a lo hora de facilitar la transferencia de calor, en lo referente a su integración o protección frente a otros materiales y en la resistencia final del elemento. Los segundos se refieren a un proceso de recubrimiento del PCM de entre 0,001 y 1 mm de diámetro. Este tipo presenta buena transmisión térmica, fácil aplicación y protección innecesaria frente a otros materiales, aunque en el caso del hormigón puede suponer una pérdida de las propiedades mecánicas del mismo. Según sea la técnica de microencapsulado, se puede clasificar en métodos físicos (pulverización, lecho fluidizado, etc.) o en métodos químicos (coacervación, polimerización interfacial, etc.)

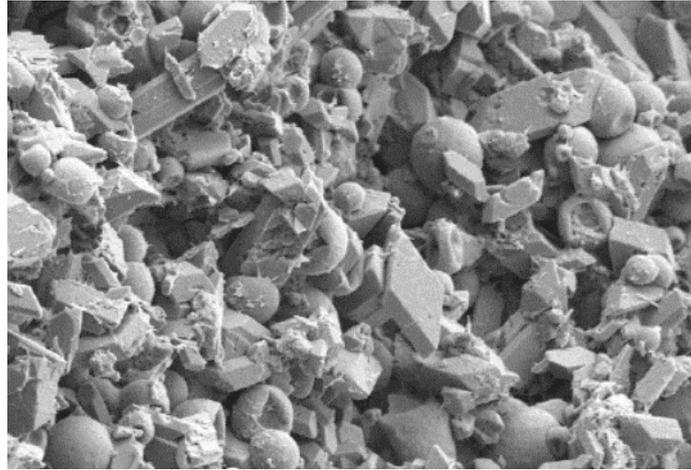


Figura 2-11 Ejemplo de aplicación de PCM microencapsulado [9]

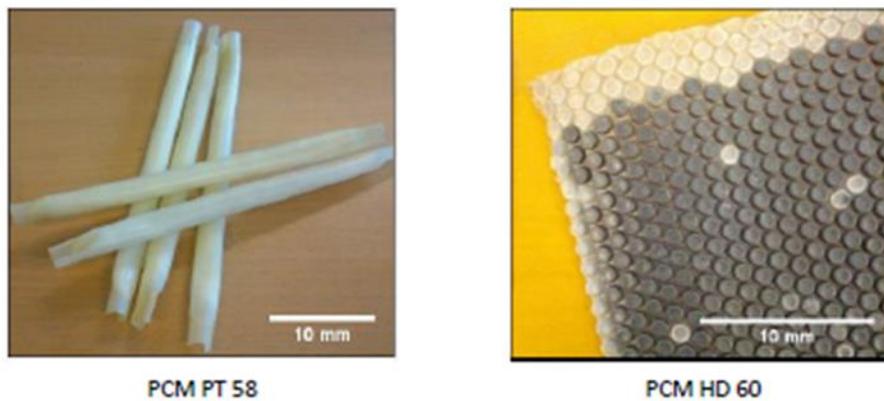


Figura 2-12 Ejemplos de PCM macroencapsulados [6]

Durante años, han sido muchos los que han realizado experimentos incorporando diferentes PCM a varios materiales de construcción (*Figura 2-13*). Se han estudiado y desarrollado métodos para su incorporación en ladrillos, bloques de vidrio, ventanas, hormigón, cemento, yeso, paneles tipo sándwich, etc. En el caso de las ventanas, el material de cambio de fase se ha incorporado entre dos cristales, consiguiendo reducir la ganancia solar y la transmisión de calor [1]. Su combinación con yeso es aplicada en enlucidos, elevando su capacidad de almacenamiento térmico y proporcionando una mayor duración en ambientes húmedos [5]. En los paneles tipo sándwich ha supuesto una posible solución al problema del sobrecalentamiento en edificios ligeros, puesto que el PCM aumenta la inercia térmica de estos [8].

Una de las principales líneas de investigación hoy en día es la incorporación de los PCM al hormigón, al ser este uno de los materiales más usados en construcción. Esta combinación de materiales será tratada en el siguiente apartado, ya que uno de los principales objetivos de este trabajo es el estudio del comportamiento del mismo después de su adicción.

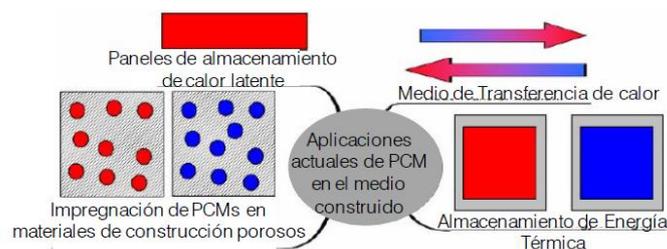


Figura 2-13 Aplicaciones de los PCM a la edificación [1]

2.4.2 Hormigón y PCM

Antes de abordar la incorporación de los materiales de cambio de fase al hormigón, resulta conveniente explicar brevemente ciertas características sobre este último, las cuales lo convierten en uno de los materiales más utilizados en edificación.

Durante el último siglo, el hormigón se ha convertido en uno de los elementos más importantes empleados en la construcción, aunque su uso se remonta varios miles de años atrás. Su uso se ha extendido más allá de los elementos estructurales como en envolventes de edificios o naves industriales. Su producción puede ser in situ o en planta, para ser transportado posteriormente a la obra. En España, la norma que regula sus características y usos, para garantizar la seguridad de los elementos y sus exigencias, es la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08).

El hormigón es una mezcla homogénea constituida principalmente por cemento, áridos (grueso y fino) y agua. También puede contener adicciones (cenizas volantes, polvo de sílice, etc.), principalmente para abaratar su coste, y aditivos (plastificantes, aceleradores de fraguado, etc.), para mejorar algunas de sus propiedades [17]. Para su fabricación, hay ciertas variables a tener en cuenta como son el tiempo de curado, la dosificación, la relación agua/cemento, la resistencia final deseada, etc.

En lo referente a sus propiedades, constituye un material con altas prestaciones. Destaca por proporcionar seguridad, durabilidad y resistencia al fuego a las estructuras que lo incorporan. Una de sus características principales es su gran resistencia a esfuerzos de compresión. Sin embargo, para mejorar su resistencia a la tracción es necesario la incorporación de estructuras de acero en su interior.

El hormigón puede presentar dos estados fundamentales [6]: fresco o endurecido. En el primero de ellos, el hormigón se encuentra en un estado que permite su manipulación durante la fase de encofrado. En el segundo, el hormigón ya ha adquirido la suficiente rigidez para impedir su manipulación tras el fraguado. A continuación, se muestra un esquema con las principales características que definen al hormigón en cada uno de estos estados:



Figura 2-14 Características según el estado del hormigón

Se han desarrollado varios tipos de hormigón dependiendo de su composición, aplicación, etc. A continuación, se muestra los diferentes tipos de hormigón existentes en la actualidad:



Figura 2-15 Tipos de hormigón [6]

Las probetas realizadas para este trabajo se encuadran dentro del hormigón en masa, en el cual la mezcla no incorpora ninguna armadura en su interior y es apta para resistir esfuerzos de compresión.

Actualmente, el uso de elementos prefabricados de hormigón está muy extendido. Consiste básicamente en la fabricación de dicha pieza de hormigón en una planta de producción. Entre los elementos que se fabrican de esta forma se encuentran bordillos, vigas, columnas, paneles y cerramientos de naves industriales y mobiliario urbano entre otros. En cuanto a sus propiedades, destacan por su rapidez de construcción, calidad, variedad, etc.

La combinación de materiales de cambio de fase con hormigón como matriz ha sido objeto de numerosos estudios (*Figura 2-16*), tanto en la fase de producción o mediante absorción, para aumentar su inercia térmica [6, 18]. El método mediante absorción presenta una serie de desventajas como puede ser la limitada capacidad de absorción debido a la pequeña porosidad. La incorporación de PCM microencapsulado durante la producción del hormigón minimiza los problemas descritos anteriormente, pero puede afectar a ciertas propiedades químicas, térmicas y mecánicas. De esta forma la conductividad térmica y la resistencia a compresión, vital en estructuras, pueden verse reducidas. Algunos autores atribuyen este empeoramiento de capacidades mecánicas al comportamiento de las cápsulas como poros ocupados por aire y a la dificultad de hidratación de algunas partículas por el fugado de PCM de cápsulas dañadas. Por ello, según estudios de hormigón que incorporan un 5% de PCM, la resistencia a compresión se puede ver afectada entre un 30% y un 60% a los 28 días. [18].

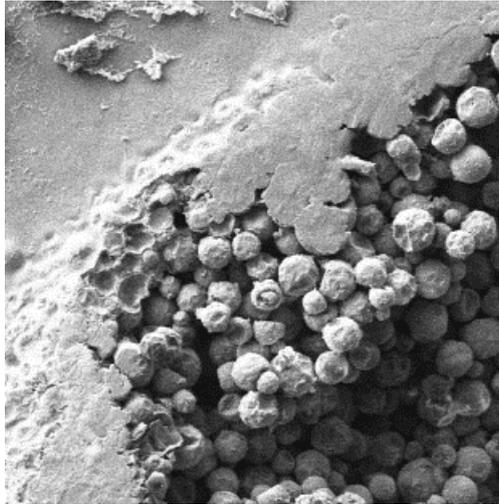


Figura 2-16 Imagen con microscopio de PCM en hormigón (75 μm x75 μm) [53]

Una variante a la forma de incorporación descrita anteriormente es la adición de estos materiales de cambio de fase mediante absorción por elementos porosos (pizarra expandida, piedras pómez, arcilla expandida, etc.) que más tarde constituirán parte del hormigón. En cuanto al grado en que afectan a las propiedades del elemento final, los niveles son similares al microencapsulamiento [18].

A pesar de todos los inconvenientes descritos anteriormente, se ha demostrado el incremento entre el 200% y el 230% del almacenamiento térmico mediante la incorporación de PCM con respecto a bloques convencionales. En cuanto a la resistencia al fuego, esta no se ve afectada. Las construcciones con PCM pueden almacenar la energía solar durante períodos diurnos y cederla durante los períodos nocturnos. [1]

La Universidad de Lleida llevó a cabo un estudio sobre la incorporación al hormigón de un PCM con un punto de fusión de 26°C combinado con el empleo de un muro Trombe. Se construyeron dos casetas (*Figura 2-17*), una con hormigón convencional y otra con hormigón PCM, y observaron una diferencia de 4°C de temperatura debido a la inercia térmica provocada por la solidificación del PCM por la mañana muy temprano y la fusión del mismo por la tarde. Obtuvieron como conclusión que al incorporar PCM se aumenta la inercia térmica del hormigón [19].



Figura 2-17 Casetas construidas para el estudio de la Universidad de Lleida [19]

Un estudio elaborado por M. Hunger sobre el comportamiento de los materiales de cambio de fase en hormigón autocompactante mostró que al aumentar la cantidad del mismo se ve reducida la conductividad térmica y aumentada la capacidad de almacenamientos de calor. Se probaron distintos porcentajes de PCM (1, 3 y 5%) y para un 5% se observó una importante reducción de la resistencia a compresión. Esto fue debido a la interacción del PCM con los materiales de la matriz, provocado por

pérdidas de las cápsulas, y diferencias entre las tensiones superficiales. Sin embargo con el 3% la resistencia se vio poco afectada [20].

Además de la aplicación del PCM a viviendas, ha sido objeto de estudio su aplicación a otros elementos como pueden ser los puentes. En este caso, se busca minimizar en elementos estructurales los efectos de los ciclos de congelación/descongelación de los materiales expuestos al ambiente [6].

A pesar de que en líneas generales se conoce como afecta y en qué nivel la incorporación del PCM al hormigón, factores como la porosidad hacen que sea necesario un análisis de las características y propiedades de los materiales para que satisfagan los requisitos estructurales finales.

Como resumen, los principales objetivos que se buscan con la incorporación de los materiales de cambio de fase son la reducción:

- Del consumo energético.
- Del dimensionamiento de las instalaciones.
- De la oscilación de las temperaturas.

3 DESARROLLO DEL PROYECTO

3.1 Pasos previos a la realización de los ensayos

En este apartado del trabajo se explicaran los instrumentos y equipos empleados durante la elaboración de las probetas y sus posteriores ensayos, así como los materiales empleados para su elaboración. También se expondrán las medidas de seguridad implementadas durante la fase experimental en el laboratorio.

3.1.1 Instrumentación y equipos de mediciones

Los instrumentos y equipos empleados durante la fase experimental de este proyecto se obtuvieron de los Laboratorios de Química y Materiales de la Escuela Naval Militar (ENM). El coste económico por la adquisición de herramientas e instrumentos ha sido bajo, puesto que lo único que fue necesario adquirir fue una sierra y una caja de ingletes. A continuación se detallarán cada una de las herramientas y equipos empleados, clasificándolos según su uso durante la experimentación y describiendo las características técnicas más relevantes (si un instrumento se emplea en varias fases, sólo se mencionará en la primera):

1. Medición de la temperatura de cambio de fase de los PCM:
 - Cuchara
 - Soporte universal con pinza
 - Tubos de ensayo con tapón
 - Vasos de precipitado
 - Vidrio de reloj
 - Mortero y pilón
 - Pinza
 - Cronómetro digital Ventix 941: divisiones 1/100'', tiempo de indicación 59' 59,99'' y muestra tiempo acumulado [21].

- Balanza analítica Blauscal: precisión de $\pm 0,01$ g y peso máximo de 600gr [22].



Figura 3-1 Balanza analítica Blauscal

- Agitador magnético con calefacción BELL SH2: capacidad máxima de agitación de 2l., plataforma 12x12cm., 1600rpm y temperatura máxima de 380°C [23].



Figura 3-2 Agitador magnético con calefacción BELL SH2

- Termómetro compacto: termómetro digital con sonda de acero inoxidable, 1m. de cable, $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ en el rango entre -30 y 120°C y $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ en el resto del rango [24].



Figura 3-3 Termómetro compacto

2. Elaboración de los moldes de las probetas:

- Sierra y caja de ingletes
- Pegamento liquido
- Papel de lija de grano fino
- Limas
- Útiles de escritura y medición
- Pie de rey
- Torno

3. Elaboración de las probetas de hormigón:

- Cubos de plástico
- Tamiz 1x1 cm
- Tijeras
- Paleta
- Varilla metálica y cuchara
- Micropipeta

4. Realización de ensayos mecánicos:

- Aparato de ensayos universal WP300 20kN: del fabricante Gunt Hamburg, permite realizar ensayos tanto de tracción y compresión como de dureza tipo Brinell. Permite cambiar su configuración empleando diferentes accesorios, aumentando de esta manera la clase de ensayos a realizar como por ejemplo ensayos de flexión o cizallamiento entre otros. No requiere ninguna alimentación externa y la fuerza se genera mediante un sistema hidráulico manual. Para realizar las mediciones cuenta con un pie de rey mecánico y un dinamómetro de 0 a 20kN [25].

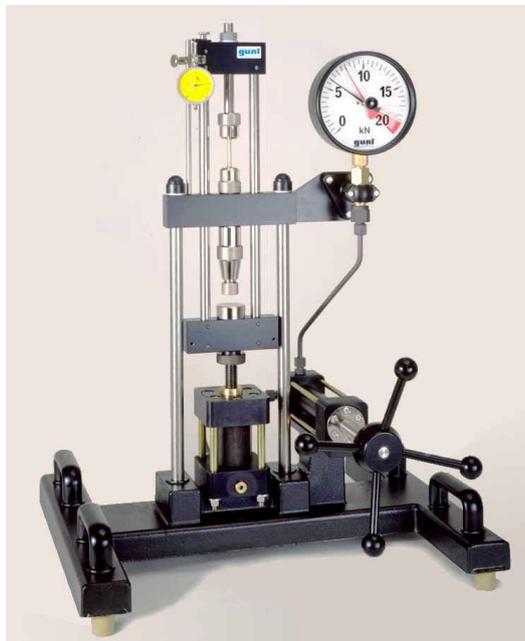


Figura 3-4 Aparato de ensayos universal [25]

En el *ANEXO II: FICHA TÉCNICA DEL APARATO DE ENSAYOS UNIVERSAL* se adjunta la ficha técnica de la máquina, incluyendo más información al respecto.

- Durómetro PCE-HT-225A (método Schmidt): como indica su propio nombre, se utiliza para medir la dureza del hormigón mediante el rebote de una pesa tensada con un muelle. El valor de rebote es introducido en unas tablas de conversión disponibles en la parte trasera del propio aparato para pasar a kg/cm^2 . Los rangos de medición abarcan desde 100 hasta 600kg/cm^2 con una precisión de $\pm 18\text{kg/cm}^2$ y una energía percutora de 2207J [26].



Figura 3-5 Durómetro

En el ANEXO III: FICHA TÉCNICA DEL DURÓMETRO PCE-HT-225A se adjunta la ficha técnica del aparato, incluyendo más información al respecto.

5. Realización de ensayos térmicos:

- 3 Bombillas de 40W
- Destornillador y pelacables
- Cable, portalámparas y enchufes
- Cajas de cartón
- Poliestireno extruido (se adjunta hoja de características en el ANEXO VI: FICHA DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL POLIESTIRENO EXPANDIDO):

CARACTERÍSTICAS

Espuma azul	Inodoro
Punto de reblandecimiento: $>100^{\circ}\text{C}$	Descomposición: $>130^{\circ}\text{C}$
Baja inflamabilidad	Temperatura de ignición: 370°C
Densidad: $25\text{-}50\text{kg/m}^3$	Insoluble en agua
Dimensiones: $60\text{x}125\text{cm}$	Espesor: 40mm
Conductividad térmica: $0,034\text{ W/mK}$	Resistencia térmica: $1,15\text{m}^2\text{K/W}$
Rango de temperaturas: $-50/75^{\circ}\text{C}$	

Tabla 3-1 Características del poliestireno extruido [27]

- Cúter
- Regla
- Masilla standard blanca

- Adaptador USB DS9490B# [28, 29]: permite la configuración y descarga de datos de un iButton de tamaño F5 al conectarlo con un ordenador, soportando el protocolo de comunicaciones 1-wire.



Figura 3-6 Adaptador USB DS9490B#

- Sensor iButton DS1923 [28, 29]: es un sensor que registra la medición de temperatura y humedad de manera autónoma almacenando la información en su memoria interna. El intervalo de tiempo es programable y establecido por el usuario. Se puede realizar hasta un total de 8912 muestras de 8-bit o 4096 muestras de 16-bit con una tasa de muestreo de entre 1s y 273 horas. Puede ser programado para tomar datos de forma inmediata, desde un periodo de tiempo definido o después de una alarma de temperatura configurada anteriormente con unos rangos de temperatura preestablecidos. Los datos son transferidos a través del protocolo 1-Wire®. Está fabricado en acero inoxidable, para garantizar su protección frente a suciedad, golpes o ambientes agresivos, y tiene unas dimensiones estándar F5 para la lectura de datos. Tiene una precisión de temperatura de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ desde -10°C a $+65^{\circ}\text{C}$, pudiendo operar desde -20°C hasta $+85^{\circ}\text{C}$ y de 0 a 100% de humedad relativa.



Figura 3-7 Sensor iButton DS1923

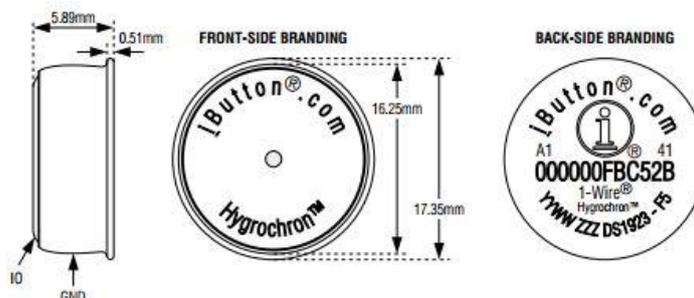


Figura 3-8 Dimensiones iButton DS1923

- Sensor iButton DS1922L-F5#: las características son idénticas a las descritas anteriormente para el sensor DS1923 a excepción de que este último solo registra la temperatura y el rango de temperaturas entre las que puede operar va de -40°C a $+85^{\circ}\text{C}$.



Figura 3-9 Sensor iButton DS1922L-F5#

6. Visualización de las probetas a través de microscopio:

- Microscopio MBL3300 [30]: es un microscopio de la marca Krüss empleado en metalurgia para la identificación y análisis de aceros y otros metales. Dispone de tres aumentos de 4x, 10x y 40x, además de un soporte para una cámara. En *el ANEXO VII: MICROSCOPIO MBL3300* se adjunta la ficha del microscopio del catálogo de *Krüss*.



Figura 3-10 Microscopio MBL3300

3.1.2 Materiales y compuestos empleados

En este apartado se tratarán los diferentes materiales y compuestos empleados durante la fase experimental. Los tres PCM empleados son sales hidratadas: acetato de sodio trihidratado, zinc nitrato y sodio tiosulfato y han sido obtenidos del Laboratorio de Química. El aceite mineral fue proporcionado por el taller de automóviles del Barrio Industrial y el aceite de girasol por el Comedor de Alumnos de la ENM. El resto de materiales fueron adquiridos para el desarrollo del proyecto.

A continuación, se detallarán las características principales de cada uno de los PCM empleados en el trabajo:

NOMBRE PCM	FOTO	CARACTERÍSTICAS
Acetato de sodio trihidratado [31]		<ul style="list-style-type: none"> • Fórmula: $\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ • Riqueza: 99% • Sólido cristalino incoloro e inodoro • Punto de fusión: 58°C • Densidad $1,45\text{g}/\text{cm}^3$ • Soluble en agua ($1250\text{g}/100\text{cm}^3$) • Estable bajo condiciones normales de uso y almacenamiento
Zinc nitrato [32]		<ul style="list-style-type: none"> • Fórmula: $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ • Riqueza: 98% • Masa molar=$297,49\text{g}/\text{mol}$ • Punto de fusión: 36°C con descomposición • Apariencia: cristales delicuescentes • Sólido incoloro a blanco • Densidad relativa: $2,07\text{g}/\text{cm}^3$ • Soluble en agua ($53,90\text{g}/100\text{g}(18^\circ\text{C})$) • Estable bajo condiciones normales de uso y almacenamiento
Sodio tiosulfato [33]		<ul style="list-style-type: none"> • Fórmula: $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ • Masa molar=$248,18\text{g}/\text{mol}$ • Sólido cristalino, incoloro e inodoro • Punto de fusión: 48°C • Densidad relativa: $1,7\text{g}/\text{cm}^3$ • Soluble en agua ($70\text{g}/100\text{ml}(20^\circ\text{C})$) • Estable bajo condiciones normales de uso y almacenamiento

Tabla 3-2 Características de los PCM empleados

Estas tres sales inorgánicas hidratadas han sido seleccionadas para el trabajo debido a que sus temperaturas de cambio de fase se encuentran dentro del margen de confort humano, por ser económicas y por estar disponibles en el Laboratorio de Química.

Para la elaboración de los moldes de las probetas se utilizaron diversos materiales. A continuación se incluye una relación de dicho materiales:

- Tubos de PVC de diámetro 25mm y espesor 1,9mm.
- Tablero de madera contrachapada de 500mm x 700mm x 2mm (espesor).
- Vasos de plástico de 1l. de capacidad y vasos de tubo.
- Botellas de plástico vacías.

Se ha empleado una mezcla de aceite mineral y aceite vegetal (girasol) al 50% cada uno como agente desmoldeante económico y sencillo de obtener [34, 35]

Para la elaboración de la matriz del hormigón se usaron diferentes materiales, incluyendo una relación de ellos a continuación:

- Cemento Portland CEM II/B-M (V-L) 32.5N con adiciones (ceniza volante silíceas y caliza L), resistencia normal media e inicial ordinaria (N) (se adjunta ficha con las características en el *ANEXO V: FICHA DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL CEMENTO*).
- Grava garbancillo de tamaño entre 6 y 12 mm.
- Arena fina.
- Plastificante (se adjunta ficha con las características en el *ANEXO IV: FICHA DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL PLASTIFICANTE*).
- Agua.

3.1.3 Medidas de precaución

La fase experimental de este trabajo se ha realizado en el Laboratorio de Química y en el de Materiales, por reunir estas las mejores condiciones y medidas de seguridad.

A la hora de manipular y almacenar los tres materiales de cambio de fase, se adoptaron una serie de precauciones. Dichos materiales se guardaron en sus envases originales en un armario especialmente destinado a albergar productos químicos, accediendo únicamente a él para extraer las cantidades necesarias de los mismos. Se ha prestado especial atención a las condiciones del lugar procurando que estuviera bien ventilado, seco y fresco. Cada una de las muestras realizadas fue etiquetada para su control. Cabe destacar que dichos materiales son estables químicamente y no suponen un grave peligro para la salud, aunque se evitó la inhalación y el contacto directo con la piel para prevenir posibles irritaciones. Para ello, durante el estudio de la temperatura de cambio de fase de los PCM se activaron las extracciones del laboratorio y se hizo uso de elementos de seguridad individual como mascarilla, gafas, guantes y bata. A la hora de eliminar los residuos, esta se llevó a cabo por el desagüe aplicando la suficiente cantidad de agua para su dilución y lavando el material empleado con abundante agua y una disolución jabonosa. Para los movimientos de recipientes calientes se han empleado unas pinzas como se puede observar en la siguiente figura:

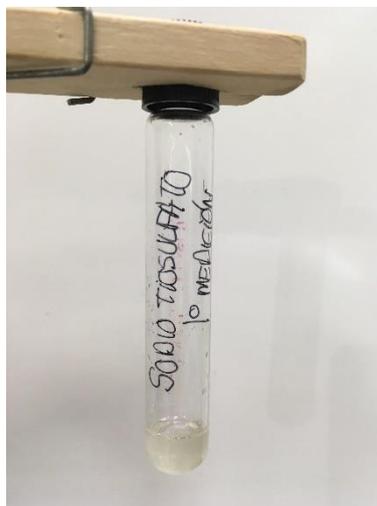


Figura 3-11 Manipulación tras calentar el PCM

Para la elaboración de los moldes de las probetas se empleó guantes y bata. Se ha extremado la precaución a la hora de realizar cortes y emplear el torno, haciendo uso de los elementos de seguridad que incorpora. A la hora de realizar el hormigón, se evitó el contacto directo con mezcla fresca al contener PCM.

Durante la realización de los ensayos mecánicos, se ha prestado especial atención a posibles trozos que pudieran salir disparados como consecuencia de la aplicación de una fuerza. También, se ha eliminado el polvo o posibles fragmentos de hormigón que pudieran dañar los equipos.

En cuanto a los ensayos térmicos, se han supervisado varias ocasiones al día durante el tiempo que han permanecido encendidos los focos calientes para evitar posibles incendios. Además, el poliestireno extruido, aparte de servir como aislante para las probetas de hormigón, se ha empleado como aislante para reducir las posibilidades de un incendio (*Figura 3-12*).



Figura 3-12 Poliestireno extruido como aislante

3.2 . Elaboración de las probetas

En este apartado se explicará todo el proceso seguido, pasos previos y pruebas para la elaboración de las probetas finales de hormigón.

3.2.1 Normativa y especificaciones de las probetas a realizar

En lo referente a normativa sobre el hormigón, se debe recurrir a la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08) y al Documento Básico de Seguridad Estructural, como fuentes donde vienen expresados los recogidos los requisitos en cuanto a seguridad estructural, seguridad contra el fuego, protección medioambiental y procedimientos que permiten cumplir con las garantías técnicas. Además, existen una serie de normas nacionales que definen características de las probetas de hormigón, ensayos, etc. A continuación, se muestra una relación de aquellas normas que han sido estudiadas para el desarrollo de este trabajo:

NORMA	DESCRIPCIÓN
UNE-EN 934-2:2010	Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Parte 2: Aditivos para hormigones. Definiciones, requisitos, conformidad, marcado y etiquetado.
UNE-EN 12390-1:2013	Ensayos de hormigón endurecido. Parte 1: Forma, dimensiones y otras características de las probetas y moldes.
UNE-EN 12390-2:2009	Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia.
UNE-EN 12390-3:2009	Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas.
UNE-EN 12390-4:2001	Ensayos de hormigón endurecido. Parte 4: Resistencia a compresión. Características de las máquinas de ensayo.

UNE-EN 12390-7:2009	Ensayos de hormigón endurecido. Parte 7: Densidad del hormigón endurecido.
UNE-EN 12504-2:2013	Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 2: Ensayos no destructivos. Determinación del índice de rebote.
UNE-EN 197-1:2011	Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes.

Tabla 3-3 Normas UNE utilizadas consultadas durante el trabajo

Aparte de todas normas mencionadas anteriormente, se han consultado las siguientes normas extranjeras:

NORMA	DESCRIPCIÓN
ASTM C31/C31M	Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field
ASTM C39/C39M	Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens

Tabla 3-4 Normas ASTM consultadas durante el trabajo

La forma de la probeta de ensayo puede ser cúbica, cilíndrica o prismática. Según la norma UNE-EN 12390-1:2013, la dimensión principal debe ser al menos tres veces y media el tamaño nominal del árido del hormigón. Además, se establece que la altura de la probeta debe ser dos veces el diámetro, es decir la esbeltez (relación entre la altura y el diámetro) debe ser dos, aunque se aceptan valores comprendidos entre uno y dos. La norma establece el diámetro mediante alguna de las siguientes dimensiones en mm: 100, 150, 200, 250 o 300. También fija una tolerancia en el diámetro designado de $\pm 0,5\%$ y en altura de $\pm 5\%$, aparte de las tolerancias de rectitud, perpendicularidad y planicidad. Pese a todo lo descrito anteriormente, la norma UNE-EN 12390-3:2009 establece un procedimiento para realizar ensayos a probetas fuera de las dimensiones especificadas anteriormente.

En lo referente a los moldes, la norma establece que deben ser estancos y no absorbentes. El material del molde debe ser de acero o fundición, pudiendo ser otro material siempre que las probetas elaboradas en estos cumplan las mismas equivalencias que las elaboradas en moldes de acero

Para este trabajo se ha optado por fabricar probetas de forma cilíndrica debido a la facilidad de construcción de los moldes destinados para ellas.

3.2.2 Preparación de los moldes

Los moldes empleados para la fabricación de las probetas han sido elaborados al no disponer de moldes específicos para el hormigón. Además, el tamaño de las probetas se ha visto condicionado por la máquina de compresión y que ha obligado a ajustar el tamaño de las mismas para poder realizar los ensayos.

Básicamente se han elaborado dos tipos de probetas: unas grandes y otras más pequeñas. Las grandes han consistido en el relleno con hormigón de vasos de tubo de plástico para crear probetas con altura de 115 mm y diámetro medio de 49,2 mm que permitan realizar los ensayos en la máquina. Antes del relleno de las mismas se realizó un orificio en la base para facilitar su extracción. Las pequeñas utilizaron unos moldes contruidos para la experimentación. Las pequeñas utilizaron unos moldes contruidos para la experimentación. Debido a las limitaciones de la máquina de ensayos y a las capacidades disponibles se optó por construir moldes con tubo de PVC. Se fijó la altura de la probeta en

40mm y el diámetro en 21,1 mm (diámetro del tubo de 25 mm y espesor de 1,9 mm). Con estos valores no se cumple una esbeltez de dos, pero como se mencionó anteriormente, el valor que se obtiene, aun así, sigue siendo válido al encontrarse entre uno y dos. Este formato de probeta pequeña fue elegido debido a las limitaciones de la máquina de ensayos, pues el espacio para colocar las probetas era pequeño y la máquina solo era capaz de aplicar un máximo de 20 kN. Si se fabricaban probetas más grandes se corría el peligro de que no se pudiera evaluar su resistencia, pues la máxima fuerza de la máquina sería insuficiente para romperlas.

Para la realización de los cortes, se marcaron 41mm en los tubos para tener en cuenta el material que se pierde al realizar el corte. En un primer momento los cortes se realizaron con una sierra y una caja de ingletes, pero las piezas obtenidas fueron descartadas al no quedar los cortes perfectamente rectos y asegurasen que la superficie de las probetas fuese a quedar plana completamente. Se optó por realizar los cortes con el torno (*Figura 3-13*), el cual garantizaba un buen acabado de la superficie.



Figura 3-13 Realización del corte del tubo de PVC

Una vez cortados los tubos, se procedió a repasar la superficie con papel de lija para eliminar posibles imperfecciones o rebabas y a su correspondiente identificación. Para ello se realizó el siguiente marcado tanto en los tubos de PVC como en las maderas en las que fueron pegados:

P231

Nº Probeta PCM Porcentaje

De esta forma, la identificación P231 hace referencia a la probeta número 2, del PCM clasificado como número 3 y con un 1% de PCM en la mezcla. Las letras HM hacen referencia al identificado de la probeta del hormigón de muestra sin PCM. En las probetas grandes también se utilizó el mismo sistema de identificación: En las pruebas experimentales, se trabaja con el 1, 2 y 3 % de PCM de la masa total de hormigón realizada. Los PCM se han identificado como:

- Acetato de sodio → nº1
- Sodio tiosulfato → nº2
- Zinc nitrato → nº3

El tablero de madera contrachapada de 500 x700 mm se corta para facilitar el llenado de las probetas. Posteriormente, se pega cada uno de los tubos de PVC en una madera y se dejar secar al pegamento. En total se realizan 45 moldes para los ensayos de compresión: 5 probetas por cada PCM y por cada porcentaje (Figura 3-14), 9 moldes para los ensayos de dureza y 6 moldes para muestras de hormigón sin PCM. En cuanto a probetas grandes, se realizaron dos por cada tipo de dosificación, otras dos con la Dosificación 3 por cada PCM al 1% y dos con la Dosificación 3 sin PCM.



Figura 3-14 Moldes para las probetas pequeñas

3.2.3 Elección de la dosificación

Una vez obtenidos los moldes para las probetas, se procedió a la elección de la dosificación a emplear durante los ensayos. La dosificación consiste en la elección de la cantidad de cada componente para realizar la mezcla y que afecta directamente a las propiedades del hormigón: consistencia, resistencia, durabilidad, etc. Un factor muy importante a tener en cuenta es la relación agua/cemento puesto que a mayor agua, mayor fluidez. El exceso de agua favorece la formación de poros al evaporarse esta, y a mayor porosidad, mayor permeabilidad y menor resistencia (Figura 3-15). De hecho, la EHE-08 fija una relación máxima de 0,65 para el hormigón en masa para exposiciones no agresivas (interiores de edificios, construcciones protegidas de la intemperie, etc.), una cantidad mínima de cemento de 200 kg/cm³ y una resistencia mínima de 20 N/mm². La densidad para hormigones normales oscila entre 2300-2500 kg/m³.

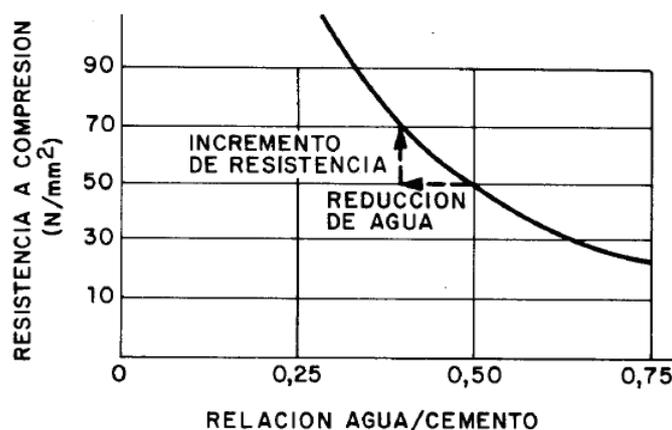


Figura 3-15 Relación a/c frente a resistencia a compresión [56]

El hormigón elaborado para el trabajo se denomina autocompactante al incorporar un aditivo denominado plastificante. Este permite que se compacte por la acción de su propio peso, presentando una mayor fluidez, capacidad de rellenado del molde y resistencia a la segregación. También presenta algunas ventajas como es su mayor durabilidad o impermeabilidad [6]. Sin embargo, requiere de un

estricto control de la dosificación. La EHE-08 establece una cantidad máxima de aditivos del 5% del total de la mezcla.

En cuanto al cemento empleado, como se mencionó en el apartado 3.1.2, es de tipo Portland CEM II/B-M (V-L) 32.5N con adiciones (ceniza volante silíceas y caliza L), resistencia normal media e inicial ordinaria (N). La siguiente figura muestra algunas de sus especificaciones:

Composición	Norma	Valor Habitual
Clinker	67-79 %	> 65 %
Cenizas + caliza	21-35 %	< 30 %

Exigencias químicas	Norma	Valor Habitual
Sulfatos (SO ₃)	≤ 3,5 %	< 3,0 %
Cloruros	≤ 0,10 %	< 0,003 %
Cromo VI soluble en agua (UNE-EN 196-10)	≤ 0,0002 %	< 0,0002 %

Exigencias físicas	Norma	Valor Habitual
Expansión (Le Chatelier):	≤ 10 mm	< 1,0 mm
Tiempo de fraguado		
Principio	≥ 75 min	> 200 min
Final	≤ 12 horas	< 300 min

Exigencias mecánicas	Norma	Valor Habitual
Resistencia a la compresión		
7 días	≥ 16,0 MPa	> 28,0 MPa
28 días	≥ 32,5 MPa	> 40,0 MPa
	≤ 52,5 MPa	< 52,5 MPa

Figura 3-16 Características del cemento empleado

De la norma UNE-EN 197-1:2011 se obtiene la siguiente tabla donde se puede observar la resistencia del cemento 32.5 N:

Clase de resistencia	Resistencia a compresión MPa			Tiempo de principio de fraguado min.	Estabilidad de volumen (Expansión) mm
	Resistencia inicial		Resistencia nominal 28 días		
	2 días	7 días			
32,5 L ^a	-	≥ 12,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≤ 10
32,5 N	-	≥ 16,0			
32,5 R	≥ 10,0	-	≥ 42,5	≤ 62,5	
42,5 L ^a	-	≥ 16,0			
42,5 N	≥ 10,0	-	≥ 52,5	-	
42,5 R	≥ 20,0	-			
52,5 L ^a	≥ 10,0	-	≥ 45		
52,5 N	≥ 20,0	-			
52,5 R	≥ 30,0	-			

^a Clase de resistencia definida sólo para los cementos CEM III.

Tabla 3-5 Resistencia del cemento 32.5N [36]

De todo lo comentado anteriormente, se obtiene como conclusión que la dosificación y las características de los materiales empleados repercute directamente en la resistencia del hormigón. Las diferentes normas nos proporcionan unos valores de resistencia previsibles en función de características como la relación agua/cemento o el tipo de cemento. Cuanto mayor sea la resistencia de este último, mayor será la resistencia del hormigón final. El objetivo es obtener una dosificación con la mayor

resistencia posible pero no será hasta la realización de los ensayos cuando podamos asegurar con total certeza la resistencia del hormigón fabricado pues hay varias variables, como las mencionadas anteriormente, a tener en cuenta. Según la EHE-08, para hormigones en masa la resistencia suele ser alrededor de 20 MPa. Por otra parte, esta misma norma proporciona unos valores estimados de la resistencia a compresión dependiendo de la edad en relación con la resistencia a 28 días, que es cuando se presupone que el hormigón alcanza el 100% de su resistencia:

Edad del hormigón (días)	3	7	28	90	360
Hormigones de endurecimiento normal	0,40	0,65	1,00	1,20	1,35
Hormigones de endurecimiento rápido	0,55	0,75	1,00	1,15	1,20

Tabla 3-6 Resistencia del hormigón dependiendo de la edad [36]

En lo referente a las dosificaciones, se propusieron las siguientes para realizar 1 kg de hormigón:

	DOSIFICACIONES			
	1	2	3	4
Grava (gr)	300	530	452,4	444
Arena(gr)	400	285	320	402,1
Cemento(gr)	198,26	124	150	120,8
Agua (gr)	99,13	59,4	75	70,3
Relación agua/cemento	0,5	0,47	0,5	0,58
Plastificante (ml)	2,6	2,6	2,6	2,6

Tabla 3-7 Dosificaciones propuestas

Las siguientes dosificaciones fueron propuestas al obtenerse de:

- Dosificación 1: esta dosificación se obtiene como resultado de destinar el 40% de la mezcla a arena, el 30% a grava y el 30% restante a agua, cemento y plastificante; aplicando una relación agua/cemento de 0,5.
- Dosificación 2: esta dosificación se obtiene como adaptación de otra propuesta en [37].
- Dosificación 3: esta dosificación es una combinación de las dos anteriores.
- Dosificación 4: esta dosificación se obtiene como adaptación de otra propuesta en [6].

Con estas cuatro dosificaciones se realizaron tanto probetas pequeñas como grandes para comprobar su resistencia a compresión. Con respecto a las probetas de la Dosificación 1, dos de ellas se rompen al extraerlas a las 24 horas. El resto permanecen intactas tras el desmolde presentando la apariencia típica del hormigón (*Figura 3-17*) con algunos poros originados por burbujas de aire. Al tacto son duras, pero al aplicar un poco de fuerza con las manos rompen. Se realizan ensayos de compresión en la máquina pero ninguna probeta tiene una mínima resistencia. En los fragmentos de las probetas, se observa que el material es frágil y quebradizo (se deshace al presionar con la mano), lo que da a entender que el cemento no ha reaccionado correctamente. Las tres últimas probetas se hidratan y se dejan curar. A las 48 y 72 horas se vuelven a realizar ensayos de compresión, obteniendo los valores se muestran en la siguiente tabla:

ENSAYO A COMPRESIÓN						
24 horas		48 horas		72 horas		
Fuerza (kN)	Resistencia (MPa)	Fuerza (kN)	Resistencia (MPa)	Fuerza (kN)	Resistencia (MPa)	
Probetas pequeñas	No resisten	No resisten	0,25	0,55	0,70	1,56
Observaciones	Presentan bastantes cavidades y rompen con la mano. Han fraguado pero el hormigón no ha reaccionado correctamente en el interior		Radio=11,95mm Ha sido hidratada sumergiéndola en agua. El cemento no ha reaccionado correctamente.		Radio=11,95mm Ha sido hidratada sumergiéndola en agua. Al tacto es más consistente y rompe en trozos mayores. El cemento no ha reaccionado correctamente.	
	Resistencia a los 5 días		Observaciones			
Hormigón sobrante	2,07 MPa (3,3 kN)		Radio=22,5mm Ensayo a los 5 días Ha sido hidratada sumergiéndola en agua.			

Tabla 3-8 Resultados de los primeros ensayos



Figura 3-17 Primeras probetas

A la vista de los resultados, la resistencia va incrementando con el tiempo pero es bastante inferior a la esperada, además de observar que el cemento no ha reaccionado correctamente. Por todo esto, se decide descartar el cemento que se encontraba en el laboratorio y emplear uno nuevo.

Con el cemento nuevo, se realizan otras probetas pero esta vez utilizando como molde vasos de tubo. Se realizan dos probetas para cada dosificación para posteriormente realizar ensayos de compresión a 24 horas y a 7 días. Para calcular la resistencia se toma el diámetro del embolo (45mm) que ejerce la fuerza sobre la probeta, ya que las probetas tienen un diámetro variable al tener forma cónica y ser el diámetro de estas mayor que el del embolo. A continuación, se muestran las resistencias obtenidas:

RESISTENCIA A COMPRESIÓN

Dosificación 1	Dosificación 2	Dosificación 2	Dosificación 4
2,51MPa (4kN)	2,57MPa (4,1kN)	3,58MPa (5,7kN)	1,88MPa (3kN)

Tabla 3-9 Resistencia a compresión a las 24 horas de las probetas grandes

Aunque la resistencia de las probetas es menor de lo esperado, estas resisten más que las elaboradas con el cemento anterior. Tras los ensayos, se observa de los fragmentos que el cemento parece que ha reaccionado correctamente.

En todas las probetas anteriores, la rotura se produce en la zona más húmeda, que coincide con aquella que ha estado en contacto con el fondo del molde y no ha estado tan en contacto con el aire. En general, todas estas probetas tienen una mayor resistencia que las primeras muestras, y se observa de los fragmentos que el cemento ha reaccionado adecuadamente en su interior puesto que estos presentan un aspecto más consistente y no son tan quebradizos como los anteriores. Los trozos que se generan al aplicarles una fuerza son más grandes.

A los 7 días se vuelven a repetir los ensayos con las diferentes probetas, obteniendo los resultados que se muestran en la siguiente tabla:

ENSAYOS A COMPRESIÓN						
24 horas			7 días			
DOSIFICACIÓN	Fuerza (kN)	Resistencia (MPa)	Observaciones ¹	Fuerza (kN)	Resistencia (MPa)	Observaciones ²
DOSIFICACIÓN 1	4	2,51	Aspecto consistente y dura No rompe con la mano Baja porosidad exterior	18,6	11,69	Rompe únicamente por la parte que ha estado apoyada al estar sumergida al ejercer una mayor presión el agua y estar más húmeda Parte de la probeta es aprovechable para ensayos de dureza Poca porosidad exterior y alguna cavidad media
DOSIFICACIÓN 2	4.1	2,57	La grieta se transmite por la grava Porosidad nivel medio	18,25	11,47	Rompe la probeta completamente debido a una grieta que se crea verticalmente Presenta cavidades de tamaño medio
DOSIFICACIÓN 3	5,7	3,58	Aspecto consistente y dura No rompe con la mano De los fragmentos se puede observar los microporos internos	<20 ³	<12,57 ³	Presenta mayor porosidad hacia la parte que ha estado más abajo en el molde Presenta algunas cavidades No rompe, solo se deteriora algunas partes
DOSIFICACIÓN 3	3	1,88	Ha roto por la parte que más ha estado en contacto con el aire Presenta demasiada humedad	12.2	7.67	Presenta porosidad y cavidades medias Rompe por la parte de arriba del molde No rompe completamente Presenta porosidad interior

Tabla 3-10 Cuadro resumen de las probetas grandes con las diferentes dosificaciones

¹Las probetas empleadas en los ensayos a 24 horas no fueron sumergidas en agua para su curado.

²Las probetas fueron sumergidas en agua hasta el momento del ensayo a los 7 días.

³La máquina solo puede ejercer una fuerza máxima de 20kN.

A la vista de los resultados, la probeta de la Dosificación 3 ha sido la que más ha resistido de todas ellas para el mismo tiempo de curado, rompiendo verticalmente en grandes trozos consistentes y con porosidad interior a las 24 horas y resistiendo sin verse prácticamente dañada durante el ensayo a 7 días. Se elige a la Dosificación 3 como base para la realización de las probetas finales.

En la siguiente figura se puede observar las probetas tras los ensayos a las 24 horas:



Figura 3-18 Probetas a las 24 horas (de izq. a der. dosificaciónes 1, 2, 3 y 4)

En la siguiente figura se puede observar | probetas tras los ensayos a los 7 días:



Figura 3-19 Probetas a los 7 días (de izq. a der. dosificaciónes 1, 2, 3 y 4)

Tras la elección de la Dosificación 3 como dosificación base, se establece en la mezcla que el 45.2% sea grava, 32% arena, 15% cemento, 7,5% agua y 0,26% plastificante. Posteriormente, se procede a realizar los cálculos teniendo en cuenta la adición de PCM. Como se comentó anteriormente, se va añadir un 1, 2 y 3% de PCM del peso total de la amasada elaborada (1000g), quedando la dosificación de la siguiente forma para cualquier PCM:

	HORMIGÓN SIN PCM	HORMIGÓN 1% PCM	HORMIGÓN 2% PCM	HORMIGÓN 3% PCM
Grava (gr)	452	447,48	442,96	438,44
Arena (gr)	320	316,8	313,6	310,4
Cemento (gr)	150	148,5	147	145,5
PCM (gr)	-	10	20	30
Agua (gr)	75	74,25	73,5	72,75
Plastificante (ml)	2,6	2,574	2,548	2,522

Tabla 3-11 Dosificaciones finales incluyendo PCM

3.2.4 Proceso de elaboración de las probetas

A la vez que se realizaban las pruebas para la elección de la dosificación final, se fue depurando cual sería el proceso de elaboración de las probetas finales y que a continuación se explica.

Lo primero de todo fue preparar el lugar donde se iba a trabajar y los materiales. Se hizo pasar la grava por un tamiz con huecos de dimensiones 1x1 cm para descartar los fragmentos con mayores dimensiones. También, se trituraron los PCM en el mortero. Además, se realizó la disolución de un agente desmoldeante con las proporciones 50% aceite vegetal y 50% aceite mineral. El lugar de trabajo quedó de la siguiente forma:



Figura 3-20 Preparación de los materiales

Tras preparar todos los materiales, se procedió a impregnar el interior de los moldes con la disolución desmoldeante preparada anteriormente y al peso de las cantidades de cada uno de los materiales a emplear (*Figura 3-21*).



Figura 3-21 Pesado de los diferentes materiales

Cada pesada fue depositada en el cubo (*Figura 3-22*) donde se añadiría todo siguiendo este orden: grava, arena, cemento, PCM y agua y plastificante juntos, tras ser mezclados previamente. Un kilogramo de hormigón permite rellenar 2 probetas grandes y 500gr. 9 probetas pequeñas.

Una vez depositados todos los materiales sólidos se procedió a realizar un primer mezclado de todos

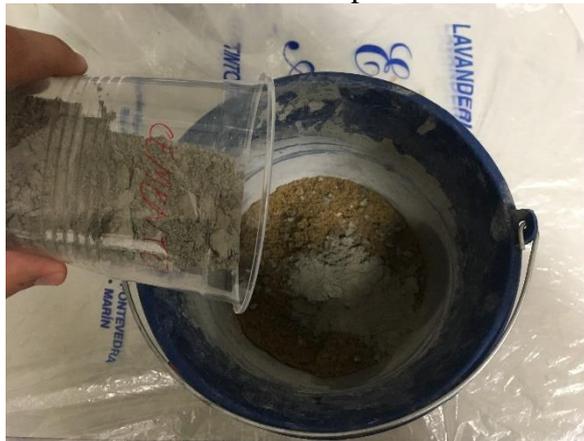


Figura 3-22 Mezclado de los materiales

ellos y posteriormente se le añadió la mezcla de agua y plastificante. Todo esto fue bien removido hasta conseguir una pasta homogénea (*Figura 3-23*).



Figura 3-23 Amasada de hormigón

Tras obtener la pasta que conforma el hormigón, se realizó el correspondiente llenado de las probetas con la misma. Para ello se siguieron las directrices fijadas por las normas. La UNE-EN 12390-2:2009 establece que el llenado de las probetas y su compactación se realizará en un mínimo de dos capas, no superando ninguna de ellas un espesor de 100 mm. Con esto se busca eliminar las burbujas de aire atrapado del interior de la mezcla y reducir la posibilidad de formación de poros o coqueas que debilitan el hormigón, pero sin eliminar el aire ocluido (burbujas microscópicas), que mejora la impermeabilidad y la resistencia a los ciclos de hielo-deshielo. En la *Figura 3-17* se pueden observar las cavidades y los poros de algunas probetas, producidos por el aire que no fue eliminado completamente del interior durante su compactación. El llenado de las probetas de este proyecto se realizó en dos capas, siendo la altura de estas la mitad de la altura de las probetas finales, y ayudados por un embudo fabricado para la ocasión, como puede verse a continuación:



Figura 3-24 Llenado de las probetas pequeñas

La norma menciona varios métodos de compactación: con aguja vibrante, mesa vibrante o manual. La empleada en este trabajo es la compactación manual que consiste en la introducción de una barra de acero en la mezcla (*Figura 3-25*). Este proceso se debe realizar al menos 25 veces sin llegar a golpear la parte inferior ni atravesar capas inferiores. Posteriormente, se golpea lateralmente con una maza (en el proyecto fue con una cuchara) el recipiente hasta que cesen de aparecer burbujas de aire en la superficie (*Figura 3-25*).



Figura 3-25 Compactación del hormigón

Una vez realizado el llenado y la compactación de los moldes se debe eliminar el hormigón sobrante y nivelar la superficie (*Figura 3-26*). La norma menciona el empleo de llanas pero debido a las pequeñas dimensiones de las probetas realizadas se realiza empleando una cuchara.



Figura 3-26 Nivelado de la superficie de la probeta

Finalmente, las probetas quedan como se puede apreciar en la siguiente figura:



Figura 3-27 Probetas finales en los moldes

Con respecto al curado de las probetas, la norma fija un tiempo mínimo de permanencia en el molde de 16 horas y un máximo de 3 días, protegida de impactos, vibraciones y deshidratación, a una temperatura de $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$. Las probetas pequeñas se extraen separando la madera de la base y empujando por un extremo y las grandes volcando el molde y dando unos ligeros golpes. Tras el desmolde, la probeta debe terminar su proceso de curación permaneciendo hasta el día del ensayo sumergida en agua a $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ o en una cámara a $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa superior al 95%. Esto es importante ya que el agua permite la reacción química del cemento y su endurecimiento. Tanto un exceso de agua, la cual puede originar porosidad, como un defecto de la misma debilitan el hormigón.

Siguiendo, los requisitos impuestos por la norma, las probetas fueron sumergidas en agua durante los primeros días (*Figura 3-28*), siendo posteriormente depositadas en una bandeja e hidratadas cada día.



Figura 3-28 Proceso de hidratación de las probetas pequeñas y el hormigón sobrante de la amasada

Dependiendo de cómo se realice el curado, el hormigón alcanzará una resistencia u otra para la misma edad como se puede observar en la siguiente figura:

Antes del ensayo a compresión se deben nivelar las superficies de los moldes con una capa de mortero de azufre para un mejor reparto de los esfuerzos según la norma. También pueden ser pulidas, en caso de que haya que reducir las dimensiones, refrentadas con mortero o emplear cajas de arena.

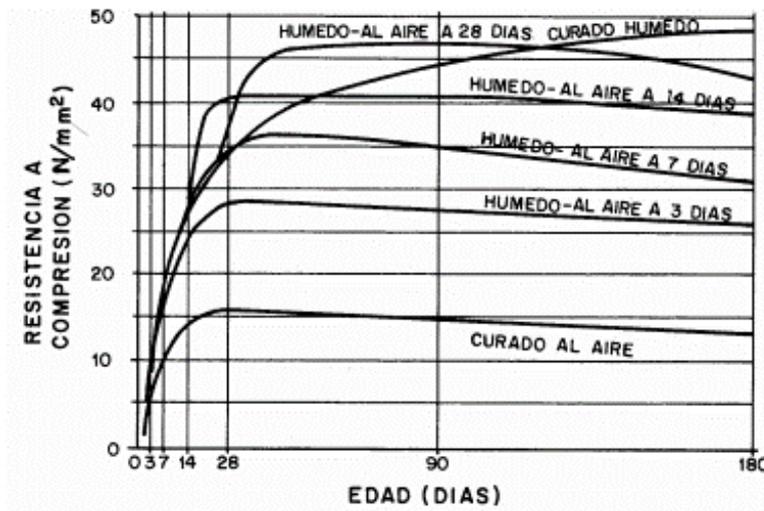


Figura 3-29 Influencia del curado en la resistencia a compresión del hormigón [57]

En la siguiente tabla, se muestra a modo resumen las dimensiones de las probetas realizadas:

	Dimensiones de las probetas	
	Altura (mm)	Diámetro (mm)
Probetas pequeñas	40	21
Probetas grandes	115	49,25 (medio)

Tabla 3-12 Dimensiones de las probetas realizadas

3.3 Ensayos realizados

3.3.1 Estudio de la temperatura de cambio de fase de los PCM

Con la realización de este estudio se pretendía determinar experimentalmente la temperatura de cambio de fase los tres PCM hidratados propuestos en este trabajo.

Para ello se pesaron cada una de las cantidades depositadas sobre un vidrio de reloj y, posteriormente, se trituraron en el mortero. Las cantidades fueron las siguientes:

	PESO PCM (gr)		
	ACETATO DE SODIO	SODIO TIOSULFATO	ZINC NITRATO
1ºMedición	1,89	1,93	1,97
2ºMedición	1,9	1,9	1,76

Tabla 3-13 Cantidades PCM para medición de la temperatura de cambio de fase

Una vez trituradas, dichas cantidades fueron depositadas en diferentes tubos de ensayos, siendo identificados cada uno de ellos como se muestra a continuación:

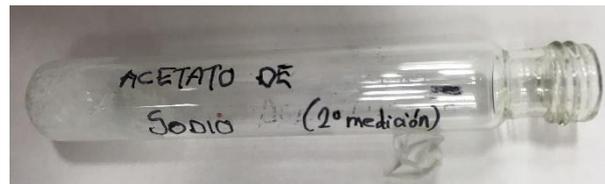


Figura 3-30 Identificado de las muestras

De cada PCM se realizaron dos mediciones diferentes, incluyendo el proceso de calentamiento y, posteriormente, el proceso de enfriamiento. Empleando el cronómetro, se realizó cada 20 segundos una lectura de las temperaturas tanto del PCM como del agua donde se estaba calentando con dos termómetros. El montaje para calentar el PCM se realizó de la forma que se puede ver a continuación:

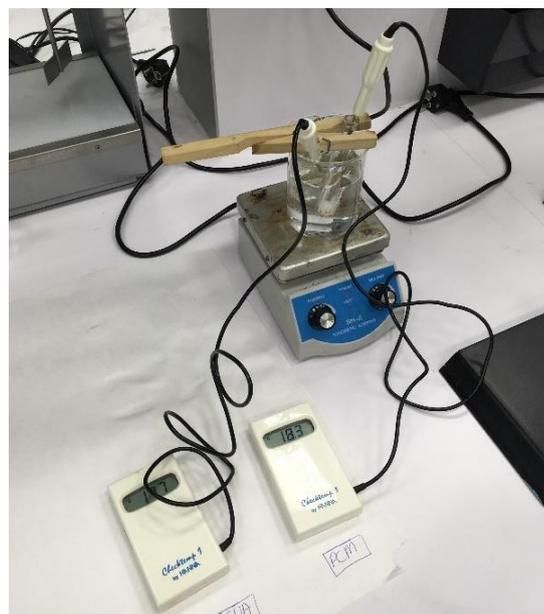


Figura 3-31 Calentamiento del PCM

El proceso de calentamiento se ha llevado a cabo sobre un agitador magnético con calefacción al baño maría, sumergiendo el tubo de ensayo en agua, siendo sujetado este por el extremo con una pinza para evitar el contacto entre el tubo y el vaso de precipitado e impedir el intercambio de calor directamente entre ellos. El agitador permitió un calentamiento más uniforme.

El calentamiento se realizó hasta los 70°C para garantizar el cambio de fase del PCM, anotando cuando empezaba a fusionarse el PCM. Una vez alcanzaba dicha temperatura, y con el PCM en estado líquido, se procedía a realizar el enfriamiento (*Figura 3-32*). Para ello, se apagaba el calentador y el agitador y el vaso de precipitados era trasladado a un soporte universal con pinza para favorecer el intercambio de calor del agua y del vaso de precipitado con el aire a temperatura ambiente. Este método fue empleado con el acetato de sodio y con el zinc nitrato. Con el sodio tiosulfato se decidió cambiar el agua tras el calentamiento, sumergiendo el tubo directamente en agua del grifo, acelerando de esta forma el enfriamiento.



Figura 3-32 Enfriamiento del PCM

Al igual que en el calentamiento, cada 20 segundos se desarrolló una medición de las temperaturas del agua y del PCM, anotando en el momento en que empezaba a solidificarse o cualquier anomalía. El enfriamiento se realizó hasta los 30°C, pues en teoría era una temperatura más que suficiente para que el PCM volviera a su estado sólido.

Una vez efectuada la primera medición de temperatura de cada PCM, se procedió a intercambiar los termómetros entre el PCM y el agua para realizar la segunda medición y poder observar cualquier anomalía de los mismos. Para la medición del sodio tiosulfato hubo que cambiar los termómetros por otros al sospecharse que podían estar midiendo mal. También para el sodio tiosulfato y la segunda medición del acetato de sodio se utilizó un calentador diferente al de resto de mediciones por estar ocupado el anterior.

Con todos los datos obtenidos, se realizaron diversas gráficas sobre la temperatura de cambio de fase de los compuestos químicos escogidos y que serán explicadas más adelante.

3.3.2 Cálculo de la densidad y estudio de la pérdida de humedad de las probetas

Como complemento al resto de ensayos se calcula la densidad de las probetas y su capacidad de pérdida de agua.

Con respecto a la densidad, la norma UNE-EN 12390-7:2009 recoge las especificaciones necesarias para el cálculo de la densidad de probetas de hormigón endurecido. Dicho documento expone que el volumen mínimo de la probeta ha de ser 1 litro, aunque permite fragmentos o probetas más pequeñas en el caso de que no se pueda usar una entera. También expone diferentes formas de calcular la masa y el volumen. La masa utilizada es la de la probeta en el momento del ensayo y el volumen se calcula a partir de las medidas efectuadas sobre la misma probeta. La fórmula que se emplea es la siguiente:

$$D = \frac{m}{V}$$

donde

D es la densidad de la probeta en los instantes previos a la realización del ensayo a compresión en kg/m^3 ;

m es la masa de la probeta en los instantes previos a la realización del ensayo a compresión en kg;

V es el volumen calculado a partir de las medidas de la probeta.

Con respecto al estudio de la pérdida de humedad, se analizan las cantidades de agua que pierden las probetas en condiciones ambientales estándar tras su hidratación transcurridas 24 y 48 horas, mediante la diferencia de pesos.

3.3.3 Ensayos de dureza

Los ensayos de dureza se encuadran dentro de los ensayos no destructivos, es decir, en los que la probeta no sufre ningún tipo de daño. Este tipo de ensayo está diseñado para la comprobación de la resistencia a compresión in situ. Mediante él se puede comprobar la uniformidad del hormigón y delimitar posibles zonas superficiales de baja calidad o deterioradas. La norma UNE-EN 12504-2:2013 recoge las especificaciones y proporciona las directrices para llevar a cabo este tipo de ensayos.

Con este ensayo se obtiene el índice de rebote en una zona de hormigón endurecido. Para ello es necesario emplear un durómetro o esclerómetro, cuyo mecanismo consiste en un muelle que al ser liberado proyecta una masa, que golpea a un vástago en contacto con la superficie de hormigón [38]. Empleando una escala adimensional numerada de 10 a 100, la cual incorpora el aparato, se mide el índice de rebote para posteriormente entrar en una tabla y obtener la fuerza de compresión en kg/cm^2 . A continuación, se puede observar el funcionamiento del esclerómetro:

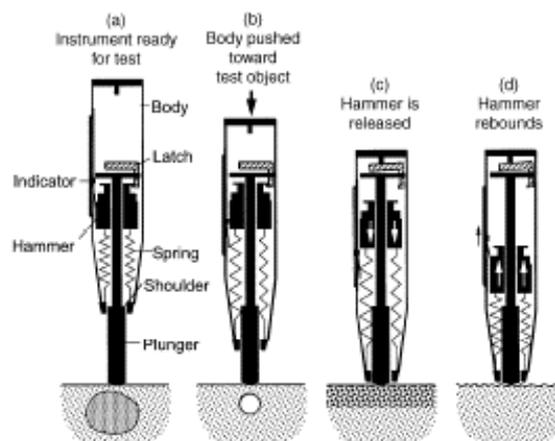


Figura 3-33 Funcionamiento del esclerómetro

Según la norma, los elementos donde se llevan a cabo los ensayos deberán tener un espesor mínimo de 100 mm, evitando las zonas porosas, rugosas o con coqueas. Se pueden ensayar en probetas pequeñas, siempre y cuando estén sujetas a una estructura.

Como pasos previos al ensayo, se tiene que tener en cuenta la humedad, el tipo de superficie, resistencia, etc., debiéndose alisar las superficies donde se vaya a realizar el ensayo y eliminando cualquier presencia de agua en la superficie. Este tipo de ensayos se ven muy afectados por las características de la superficie, puesto que una cavidad o un árido grueso pueden puede que se obtenga un valor diferente al real. Antes de realizarlo sobre la probeta, se prueba el esclerómetro realizando tres mediciones sobre el yunque del laboratorio para asegurar que funciona correctamente.

Una vez probado, se procede a realizar el ensayo sujetando el esclerómetro firmemente y en una posición perpendicular a la superficie de la probeta (*Figura 3-34*). También se puede realizar con cierto ángulo y posteriormente aplicar las correcciones. Se va ejerciendo gradualmente presión hasta que la masa golpea la probeta. Según la norma, se deben tomar al menos nueve lecturas con una distancia entre los puntos de impactos de 25mm y a 25mm del borde de la probeta. El valor final del índice de rebote será la media de todas las mediciones realizadas anteriormente. Con dicho valor, se entra en la tabla que incorpora el durómetro y se obtiene la fuerza en km/cm^2 . Mediante la siguiente tabla se puede relacionar la dureza con la resistencia a compresión [39]:

Kg/cm²	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600
N/mm²	9,81	14,71	19,62	24,52	29,53	34,33	39,24	44,14	49,05	53,95	58,86

Tabla 3-14 Relación entre dureza y resistencia a compresión

Los ensayos se efectuaron sobre las probetas grandes, ya que la fuerza que ejerce el esclerómetro es demasiado grande y rompe las probetas pequeñas. Las pruebas se desarrollaron sobre una superficie dura para evitar posibles amortiguamientos.



Figura 3-34 Ensayo de dureza

3.3.4 Ensayos a compresión

La norma UNE-EN 12390-3:2009 hace referencia a los ensayos para hallar la resistencia a compresión del hormigón una vez que se ha endurecido la mezcla y se ha obtenido la carga máxima para comprobar que cumple con los requisitos exigibles. Esta resistencia se verá afectada por diversos factores como el tamaño y la forma de la probeta, la dosificación, el proceso de fabricación seguido, la edad de la probeta o la temperatura y humedad.

Antes de entrar en detalle en la norma anterior, es necesario mencionar ciertos aspectos genéricos sobre las máquinas de ensayos y que vienen recogidos en la norma UNE-EN 12390-4:2001. Esta norma establece que para probetas pequeñas se debe utilizar adaptaciones para alinear las caras de las probetas perfectamente con los platos de la máquina. También permite el uso de bloques espaciadores para ajustar el espacio vertical disponible para el ensayo apoyándolos en el plato inferior. Con respecto al área de contacto, los platos tendrán al menos el área de la probeta utilizada, sino más, y la carga debe aplicarse de forma uniforme y sin fluctuaciones.

A la hora de realizar el ensayo a compresión, es necesario secar la probeta antes de colocarla en la máquina y eliminar cualquier resto que pueda quedar en los platos de ensayos anteriores. Como se comentó anteriormente, existen diferentes formas de nivelar las superficies de las probetas siendo una de ellas el método de la caja de arena. Al no disponer de medios, no se puede realizar la nivelación de acuerdo con la norma, pero se ha realizado una variación del método comentado anteriormente para nivelar una superficie de las probetas grandes empleadas. Estas tienen una de sus superficies con forma cóncava debido al molde empleado, pero para favorecer el reparto de cargas, dichas cavidades fueron rellenadas con arena, sobre la que se ejercía directamente la fuerza. Las pequeñas no fue necesario nivelarlas. En la siguiente figura se puede apreciar la arena de la nivelación en la parte superior:



Figura 3-35 Nivelación de las probetas

La alineación de la probeta se realizará con respecto al plato inferior. A pesar de que la máquina es manual, se intenta mantener una velocidad de carga constante hasta que la probeta rompa y se registra entonces la máxima carga, momento en cual se deja de aplicar la fuerza.

Dependiendo de si ensayamos probetas pequeñas o grandes se emplean diferentes acoples para platos de igual diámetro. En la siguiente figura se puede observar cómo queda el montaje para la realización del ensayo:



Figura 3-36 Montaje de la máquina para probetas grandes (izq.) y pequeñas (der.)

Una vez se ha alcanzado la carga máxima, se valora el tipo de rotura de la probeta. La norma UNE-EN 12390-3:2009 clasifica las roturas en satisfactorias y no satisfactorias. Estas últimas pueden ser causadas por fallos en los procedimientos o en la máquina. En las siguientes figuras se muestran ejemplos de roturas satisfactorias:

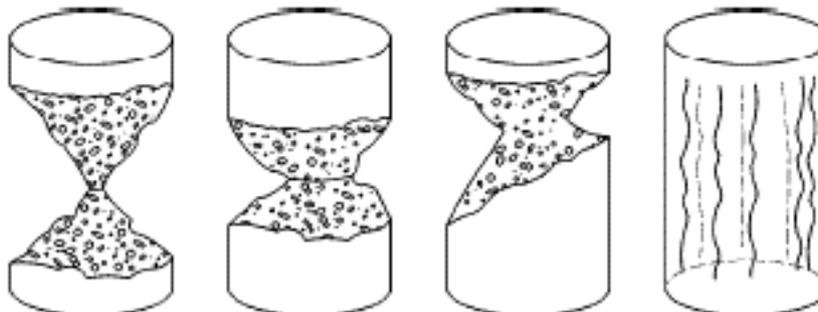


Figura 3-37 Roturas satisfactorias en probetas cilíndricas [40]

En la siguiente figura se muestran ejemplos de roturas no satisfactorias:

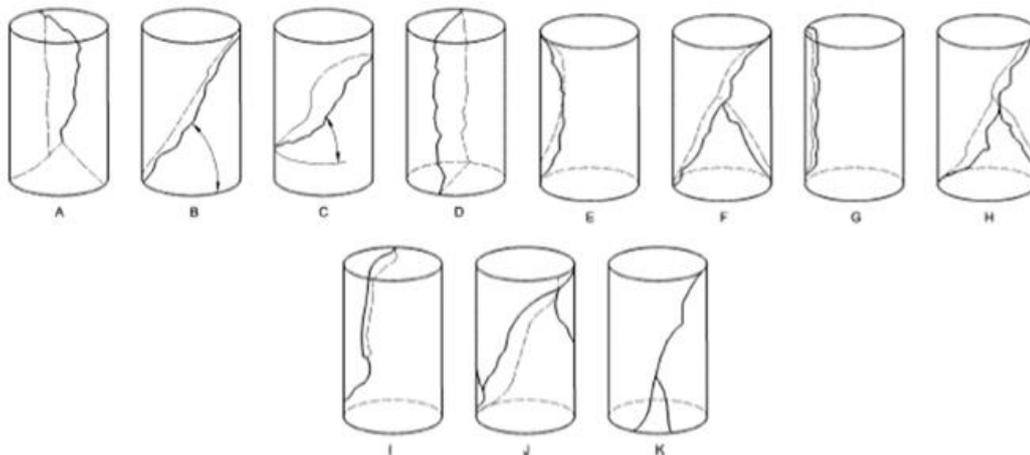


Figura 3-38 Roturas no satisfactorias en probetas cilíndricas [40]

A continuación, se puede observar diversos ejemplos de roturas de probetas realizados durante este trabajo:



Figura 3-39 Diferentes roturas de probetas

Una vez se haya producido la rotura de la probeta, se habrá alcanzado la carga máxima pudiendo observar en el indicador la carga alcanzada. Para obtener la resistencia a compresión debemos emplear la siguiente ecuación:

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

donde

f_c representa la resistencia a compresión (MPa o N/mm²);

F representa la carga máxima alcanzada (N);

A_c representa la sección transversal de la probeta sobre la que se ejerce la fuerza de compresión.

La resistencia a compresión se debe expresar redondeándola al 0,5 MPa más cercano [40].

En el anexo B de [40] viene expresado el procedimiento para realizar ensayos a probetas con dimensiones no normalizadas, según la norma UNE-EN 12390-1:2013, como es el caso de las probetas de este trabajo. Se debe realizar tres medidas del diámetro en cada una de las caras separadas 60° y tres medidas de la altura separadas 120°. En caso de que una dimensión exceda un ±2 % el tamaño designado, la probeta debe ser rechazada o ajustada. Con las seis medidas del diámetro se obtiene el diámetro medio y se calcula el área media de la probeta. El ensayo se desarrolla de igual manera a la descrita anteriormente.

Todos los datos obtenidos serán mostrados y evaluados posteriormente.

3.3.5 Análisis microscópico de las probetas de hormigón.

Para realizar este estudio, se emplearán los fragmentos de las diferentes probetas con distintas cantidades de PCM. Aunque el microscopio MBL3300 está especialmente diseñado para metales, se empleará para estudiar las superficies y el interior de las probetas al no disponer de otro. Se utiliza el objetivo de 10 aumentos, al ser éste con el que mejor se observa de los tres disponibles. La finalidad principal es intentar encontrar diferencias superficiales entre las distintas probetas.

3.3.6 Ensayo de la conductividad térmica de las probetas

Para el estudio de la conductividad térmica de las probetas se descartó el zinc nitrato, pues de los tres PCM es el que menos resistió a los ensayos de compresión. Además, se escogió un 1% de PCM puesto que era el porcentaje que mejores resultados estaba proporcionando. De esta forma, se ha analizado la conductividad térmica del acetato de sodio, del sodio tiosulfato y del hormigón sin PCM.

Para la realización de este ensayo, se comenzó construyendo los tres módulos donde se llevarían a cabo los ensayos. Primero, se montó la instalación eléctrica destinada a funcionar como foco caliente. Está consistió en el acople a un cable de 1,5m de longitud de un enchufe por un extremo y por el otro de un portalámparas. En total se prepararon tres cables, destinados a servir junto a 3 bombillas como focos calientes para las probetas. Las bombillas empleadas fueron de 40W.

La instalación fue montada en tres cajas de cartón, cuyos interiores fueron recubiertos por poliestireno extruido de 40 mm de grosor. Las partes que conformaron el aislante interno fueron cortados tras tomar y marcar las medidas en las planchas de poliestireno. Una vez montados los trozos, se procedió a realizar los agujeros destinados a albergar las probetas y los portalámparas. Se procuró que dichos agujeros tuvieran la apertura mínima para que pudieran sujetar tanto los portalámparas como las probetas. El extremo de estas últimas, que sobresalía de la caja, fue aislado con un trozo de poliestireno (*Figura 3-40*), dejando únicamente sin tapar las bases de las probetas donde irían instalados los sensores de temperatura.



Figura 3-40 Fabricación de los módulos

Las esquinas del interior de las cajas fueron forradas con papel de aluminio adhesivo para un mayor aislamiento. Además, a 8 cm de las probetas se instaló un trozo de poliestireno para apantallar e impedir que la luz y el calor de la bombilla incidieran directamente sobre la probeta y el sensor (*Figura 3-41*). Finalmente, se marcaron y pegaron los sensores a las probetas mediante masilla. En el interior de la caja se instalaron los sensores DS1923 y en el exterior se instalaron los sensores DS1922L-F5#, que miden únicamente temperatura. En total se instalaron 6 sensores en las probetas más un sensor DS1923, que se colocó en el exterior de una caja sin estar en contacto con el hormigón para medir la temperatura y humedad del ambiente.



Figura 3-41 Interior de la caja con el sensor instalado en la probeta

A continuación, se muestra una figura con las tres cajas terminadas:



Figura 3-42 Módulos terminados sin las tapaderas

Los sensores fueron programados para que comenzaran a registrar datos a las 18:00 del día 17 de febrero cada 10 minutos. El software para programar los sensores y descargar las mediciones puede ser adquirido gratuitamente desde la página web de iButton.

Todos los días se encendía el sistema entre las 08:00 y 09:00 y se apagaban entre las 20:00 y 21:00 para hacer coincidir aproximadamente el tiempo de encendido con la duración del día y poder evaluar de esta forma las diferencias de temperatura. El día 20 de febrero se comprobaron que los sensores medían correctamente conectándolos a un ordenador y observando las mediciones que habían registrado.

Tras estar una semana instalados los sensores son arrancados de las probetas de hormigón para poder volcar todas las mediciones en un ordenador y poder graficar dichos datos para su posterior evaluación y comparación entre ellos. Además, se calculan una serie de parámetros térmicos para poder comparar las tres probetas.

4 RESULTADOS

4.1 Caracterización de los PCM empleados

4.1.1 Introducción

En este apartado se expondrán los resultados obtenidos mediante el estudio de la temperatura de cambio de fase para la caracterización de los PCM empleados.

En esta parte del trabajo participó la profesora Claudia Luhrs, profesora del Departamento de Ingeniería Mecánica y Aeroespacial de la Escuela Naval Universitaria de Monterrey (EEUU) que, analizó unas series de muestras de los PCM empleados durante este trabajo. Los resultados de su análisis fueron incorporados tanto a este trabajo como al realizado por el AF Rodríguez Buzón, al ser estos de interés ambos.

El estudio llevado a cabo consistió en el análisis de diferentes muestras de PCM mediante calorimetría diferencial de barrido, o en inglés Differential Scanning Calorimetry (DSC), para obtener los rangos de fusión de los materiales de cambio de fase y su capacidad calorífica. Para ello, resulta conveniente explicar brevemente en que consiste esta técnica.

La calorimetría diferencial de barrido se encuadra dentro de los análisis térmico diferencial (DTA). Consiste en una técnica de gran precisión que permite analizar las transiciones térmicas, es decir, los cambios que experimenta una sustancia al calentarse, y determinar la cantidad de calor liberado o absorbido por una sustancia a una velocidad constante durante un intervalo de temperaturas. Para llevar a cabo esta técnica son necesarias dos cápsulas: una con la muestra de sustancia a analizar y otra vacía, que se utilizará como referencia. Ambas son calentadas mediante calefactores y un sistema controla que ambas cápsulas se encuentren a la misma temperatura (*Figura 4-1*). Cuando dicho sistema detecta una diferencia de temperaturas debido a un proceso exotérmico o endotérmico, el equipo compensa la energía necesaria para que ambas cápsulas mantengan siempre la misma temperatura [41].

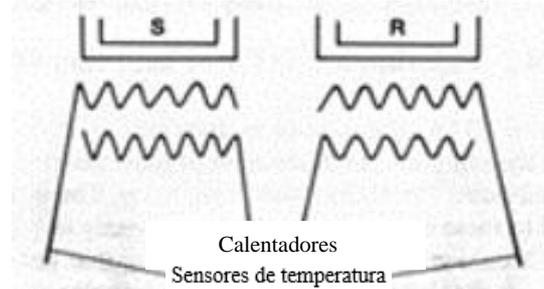


Figura 4-1 Esquema DSC [59]

Lo interesante de las gráficas obtenidas mediante DSC, son las desviaciones con respecto a la línea base. Las curvas calorimétricas presentan las siguientes zonas:

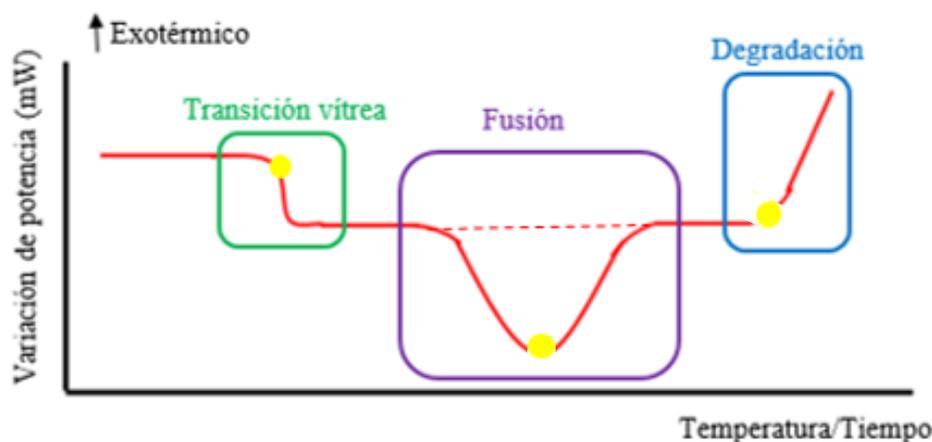


Figura 4-2 Zonas de las curvas calorimétricas

De la gráfica se puede obtener el flujo de calor (q/t) y la velocidad de calentamiento ($\Delta T/t$), de cuya combinación se puede obtener la capacidad calorífica ($C_p = q / \Delta T$).

Como se expresa en la figura, los procesos que se produzcan hacia arriba serán exotérmicos (desprenden calor) y los que se produzcan hacia abajo serán endotérmicos (absorben calor). La primera zona (en verde), donde se produce un salto de la línea base, se corresponde con la transición vítrea; la segunda zona (en morado) se corresponde con un proceso endotérmico asociado a la fusión; y la tercera zona (en azul) se corresponde a un proceso exotérmico asociado a la degradación o combustión de la sustancia. Todos los procesos se producen entre un rango de temperaturas, aunque se consideran los puntos centrales de dichas curvas (en amarillo en el dibujo) como las temperaturas representativas de los procesos, excepto en la degradación, que se considera como temperatura representativa la temperatura de inicio del proceso de degradación. Se explicará a continuación con más detalle la segunda zona.

La desviación con respecto a la línea base se produce debido a que el calentador sobre el que se encuentra la muestra, deberá suministrar una mayor cantidad de calor para mantener la misma velocidad de calentamiento y conseguir fundir la sustancia. La temperatura del pico de esta área se considera la temperatura de fusión y al medir el área se puede obtener el calor latente de fusión en J/g.

4.1.2 Análisis de los resultados obtenidos mediante DSC

En el eje de las abscisas se ha representado la temperatura en $^{\circ}\text{C}$ y en el eje de las ordenadas la variación de potencia por unidad de masa (mW/mg). Con respecto al criterio de signos, se ha establecido que los procesos que se producen hacia abajo son exotérmicos (desprenden calor) y los que se producen hacia arriba son endotérmicos (absorben calor).

A continuación se muestran los resultados enviados desde EEUU:

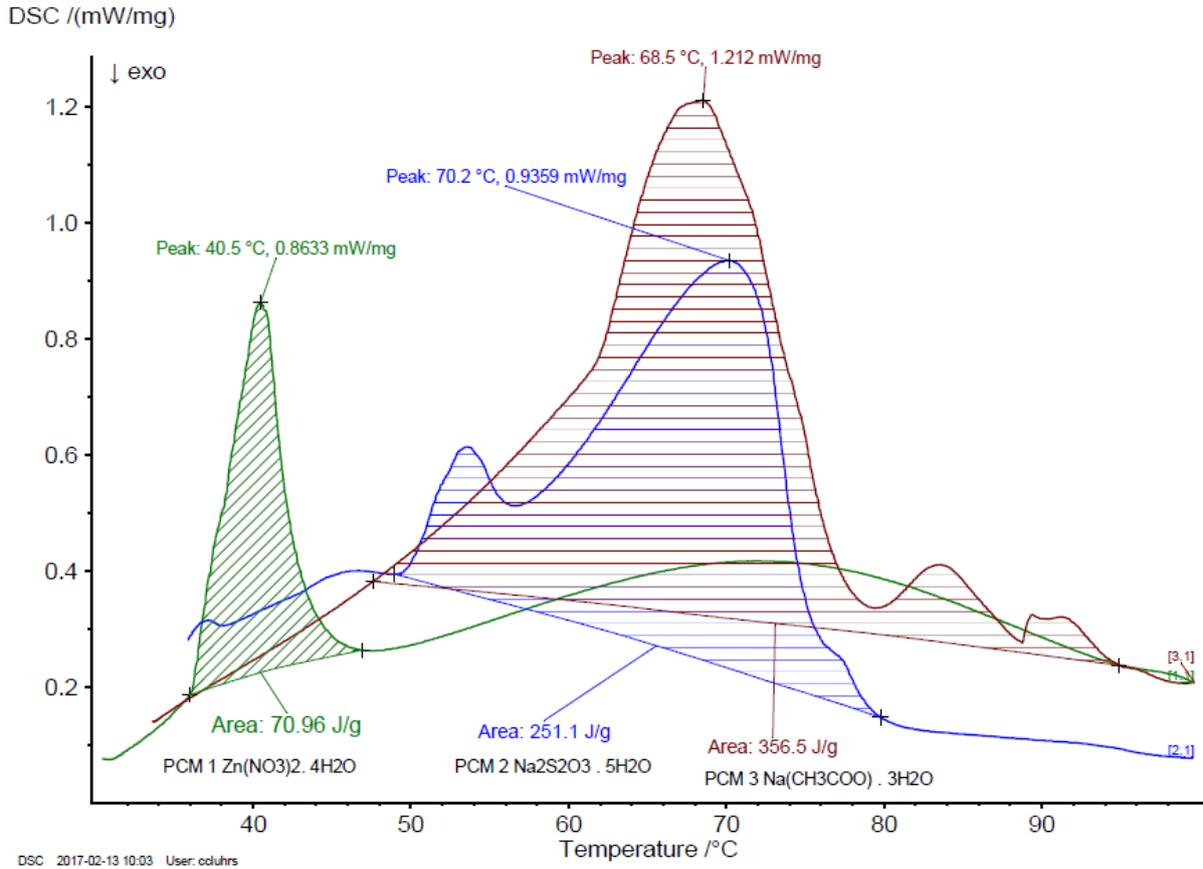


Figura 4-3 Gráficas de los tres PCM mediante DSC

Aunque se han analizado independientemente, se han expresado todas las curvas de los diferentes PCM en la misma gráfica para poder comparar entre ellas (Figura 4-3). De esta forma, la gráfica de color verde corresponde con el zinc nitrato, la azul con sodio tiosulfato y la roja con el acetato de sodio. Las áreas rayadas en la gráfica corresponden con las desviaciones con respecto a la línea base de cada uno de los materiales de cambio de fase. Además, en la gráfica vienen indicados los valores de dichas áreas, las temperaturas de fusión y los puntos de comienzo y finalización de los procesos de fusión.

A continuación, se muestran todos los datos susceptibles de ser extraídos de la gráfica en una tabla:

	CURVAS CALORIMÉTRICAS DE LOS PCM		
	Zinc Nitrato	Sodio Tiosulfato	Acetato de sodio
Temperatura de fusión (T_f) (°C)	40,5	70,2	68,5
Entalpía de fusión (ΔH_f) (J/g)	70,96	251,1	356,5
Temperatura de inicio del proceso de fusión (°C) (aprox.)	36	49	48
Temperatura de finalización del proceso de fusión (°C) (aprox.)	47	80	95

Tabla 4-1 Resultados curvas calorimétricas

Los tres materiales de cambio de fase se encuentran dentro del rango de temperaturas de cambio de estado de las sales (*Figura 2-6*). Sin embargo, los resultados obtenidos arrojan que el único que se encuentra dentro del rango de temperaturas de interés para aplicar en construcción es el zinc nitrato. Los otros dos tienen unos rangos de temperatura más amplios pero sus temperaturas de fusión los hace totalmente inviables para emplearlos en edificación. En condiciones normales, una construcción que incorpore sodio tiosulfato o acetato de sodio nunca va a alcanzar una temperatura de 70,2 y 68,5°C respectivamente, únicamente con la energía incidente del sol. No obstante, las curvas de estos encierran una mayor área, por lo que tendrán una mayor capacidad de absorción de energía, la cual puede ser aprovechada en otros tipos de aplicaciones.

Las gráficas del sodio tiosulfato y acetato de sodio presentan otros picos más pequeños. Estos se deben a que la sustancia no es completamente homogénea, de manera que cada uno de los componentes de la mezcla funde a una temperatura diferente empezando por aquellos que requieren un menor aporte calorífico, incluida el agua presente. El pico más alto es el más representativo de todos ellos. Tras alcanzar el máximo y la posterior bajada de los picos endotérmicos, las curvas recobran las líneas base mostrando la estabilidad de los materiales tras ser calentados, que de lo contrario podrían dar indicios de descomposición.

4.1.3 Estudio de la temperatura de cambio de estado de los PCM

Los resultados obtenidos del estudio de la temperatura de cambio de estado se han obtenido según el proceso explicado en el apartado 3.3.1. A continuación, se exponen las gráficas obtenidas de las seis mediciones llevadas a cabo a los tres PCM.

Como resultados de la primera medición del acetato de sodio se han obtenido las siguientes gráficas:

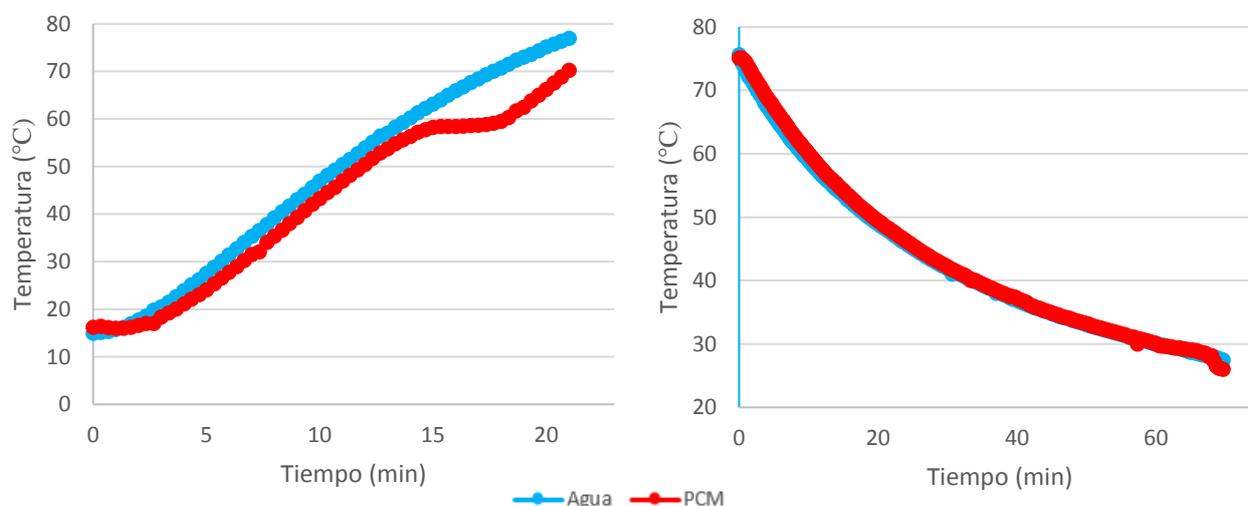


Figura 4-4 Gráficas acetato de sodio para la 1ª medición (calentamiento a la izq. y enfriamiento a la der.)

Donde es posible apreciar claramente la zona de calor latente de fusión durante el calentamiento, donde se produce el cambio de estado a una temperatura constante de 58,4°C durante aproximadamente 3 minutos. El enfriamiento del PCM se produce a la vez que el del agua, cediendo el calor al ambiente. No se llega a apreciar el punto donde comienza a cambiar de estado y no llega a solidificar por completo, formándose una especie de pasta espesa y de color blanquecino. El proceso de calentamiento se prolonga durante 21 minutos y el de enfriamiento durante 70 minutos.

Como resultados de la segunda medición del acetato de sodio se han obtenido las siguientes gráficas:

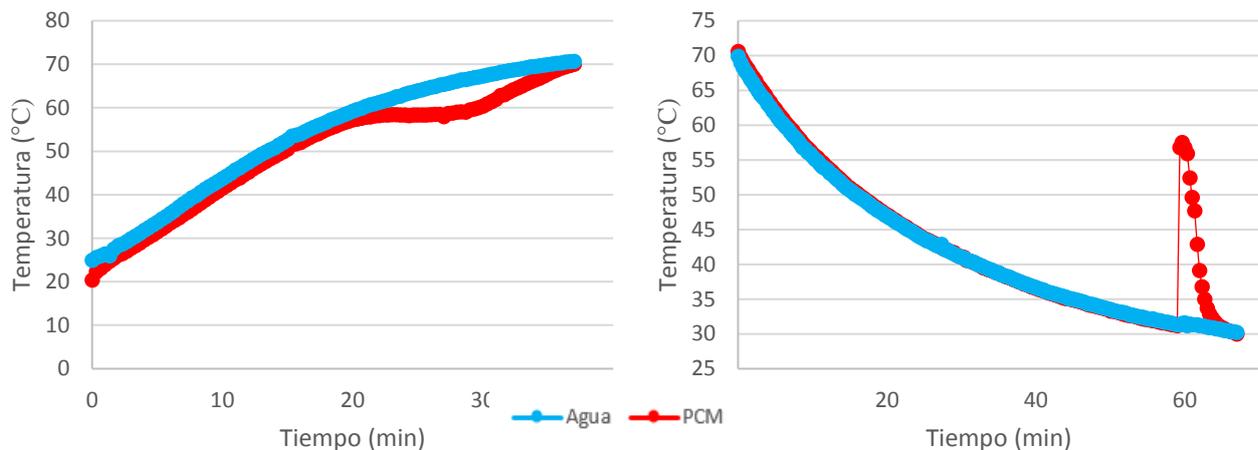


Figura 4-5 Gráficas acetato de sodio 2ª medición (calentamiento a la izq. y enfriamiento a la der.)

En esta segunda medición, también es posible apreciar claramente la zona de calor latente de fusión, donde la temperatura se mantiene constante en $58,3^{\circ}\text{C}$ durante aproximadamente 4 minutos. Es durante esta temperatura cuando se produce el cambio de estado, aunque no llega a fundirse completamente quedando algunas partículas sólidas. Las pendientes de esta curva tienen una menor inclinación con respecto a la 1ª medición como consecuencia de que la duración del proceso ha sido mayor en este caso, en concreto de 37 minutos. Esto se debe principalmente a que el calentador utilizado no fue el mismo en ambos casos debido a problemas técnicos. A pesar de que las temperaturas de inicio tanto del PCM como del agua son mayores en la segunda medición, la capacidad de calentar del calefactor en la segunda medición es menor.

En el enfriamiento de la segunda medición hay unas importantes diferencias con respecto al primero. Al igual que en la primera medición, el enfriamiento del PCM se produce a la vez que el del agua hasta que pasados 19 minutos comienza a formarse una especie de pasta a una temperatura del PCM de $47,8^{\circ}\text{C}$. Continúa descendiendo lentamente la temperatura hasta que pasados 59 minutos y con una temperatura del PCM de $31,2^{\circ}\text{C}$, se produce un incremento brusco de su temperatura hasta los $57,5^{\circ}\text{C}$, momento en el cual se produce repentinamente su completa solidificación. La temperatura del agua apenas se ve incrementada dos décimas. Tras este pico de temperatura, continúa rápidamente el descenso de la misma hasta los 30°C . El proceso de enfriamiento total se prolonga durante 67 minutos.

El proceso general experimentado anteriormente se conoce como subenfriamiento, y consiste en el enfriamiento de un líquido por debajo de su temperatura de congelación sin que este llegue a cambiar a estado sólido. Cuando las moléculas alcanzan el punto de solidificación están tan desordenadas que no pueden formarse estructuras cristalinas y su temperatura continua descendiendo. Sin embargo, en el momento que algunas moléculas se ordenen, se formará un núcleo sólido y dicho estado se extenderá por toda la muestra. Este proceso se origina cuando una sustancia se enfría lentamente y sin perturbaciones. Durante el proceso tiene lugar un fenómeno conocido como recalcancia y que consiste en el rápido incremento de la temperatura por un cambio de fase exotérmico [42, 43].

Como se ha explicado, el salto brusco de temperatura a los $57,7^{\circ}\text{C}$ forma parte de un proceso de subenfriamiento. Debido a alguna vibración del soporte que sujetaba la muestra, las moléculas del acetato de sodio, que se habían enfriado lentamente, se ordenaron creando un núcleo sólido y provocando un proceso exotérmico. Dicha energía acumulada fue liberada en forma de aumento de temperatura y cambio de estado del PCM. Este fenómeno de subenfriamiento es normal en las sales como se indicó cuando se habló de ellas, siendo lo anormal que no se produjera durante el enfriamiento en la primera medición pudiendo deberse a impurezas o vibraciones de la sustancia.

Como resultados de la primera medición del sodio tiosulfato se han obtenido las siguientes gráficas:

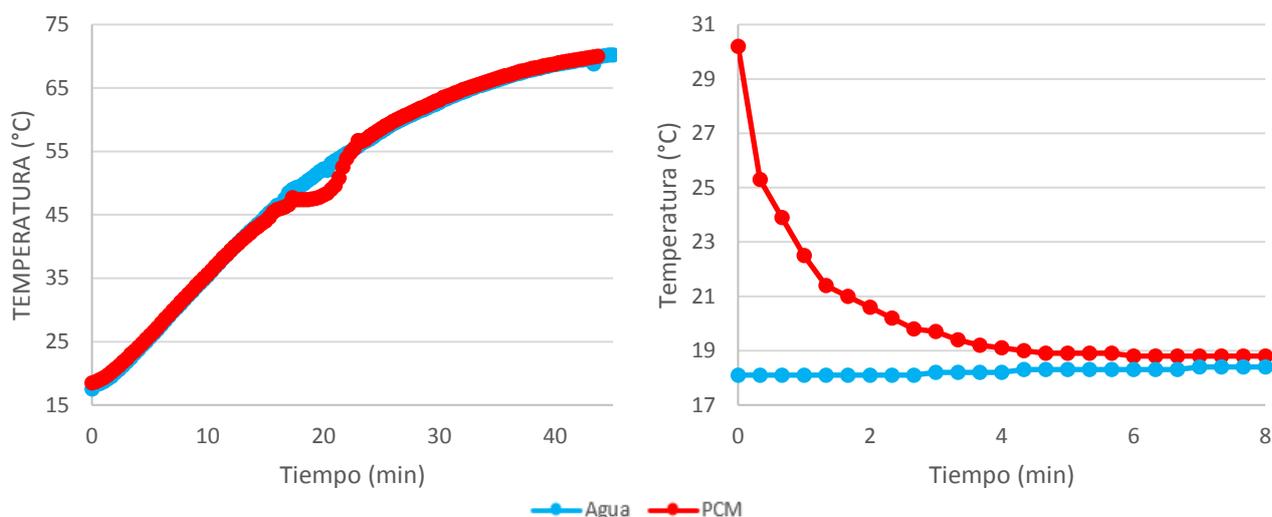


Figura 4-6 Gráficas sodio tiosulfato para la 1ª medición (calentamiento a la izq. y enfriamiento a la der.)

También se puede apreciar la zona de calor latente de fusión durante el calentamiento, donde se produce el cambio de estado a una temperatura media de 47,4°C durante aproximadamente 3 minutos. El proceso de calentamiento se prolonga durante 45 minutos hasta los 70°C, temperatura a la cual se ha fusionado por completo la muestra de sodio tiosulfato. Este proceso lleva más tiempo que otros al ser utilizado el mismo calentador que en la segunda medición que el acetato de sodio y porque en este caso el tubo de ensayo estuvo sujeto con una pinza para evitar el contacto directo con el vaso de precipitado. Además, se utilizan dos termómetros diferentes, pues los anteriores están averiados.

En este caso, se decide variar el método de enfriado y el tubo de ensayo que contiene la muestra de PCM se sumerge en agua a temperatura ambiente. Al principio la diferencia de temperaturas es considerable pero al poco tiempo ambas prácticamente se igualan. El proceso de enfriamiento es bastante más rápido que los anteriores, empleándose tan sólo 8 minutos para alcanzar la temperatura de 18,8°C. Al producirse un enfriamiento rápido no se produce el fenómeno del subenfriamiento y el PCM no recupera su estado sólido (*Figura 4-7*). Al día siguiente al ensayo, la muestra continúa en estado líquido pero con un aspecto más viscoso.

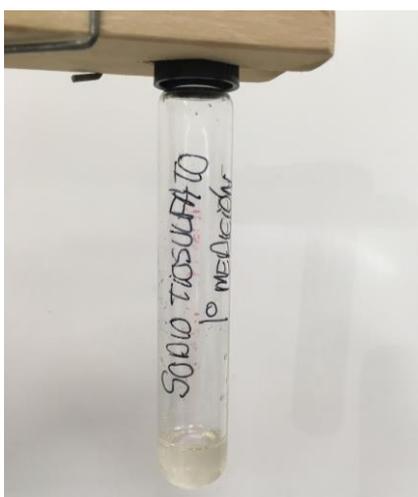


Figura 4-7 Aspecto del sodio tiosulfato tras ser enfriado

Como resultados de la segunda medición del sodio tiosulfato se han obtenido las siguientes gráficas:

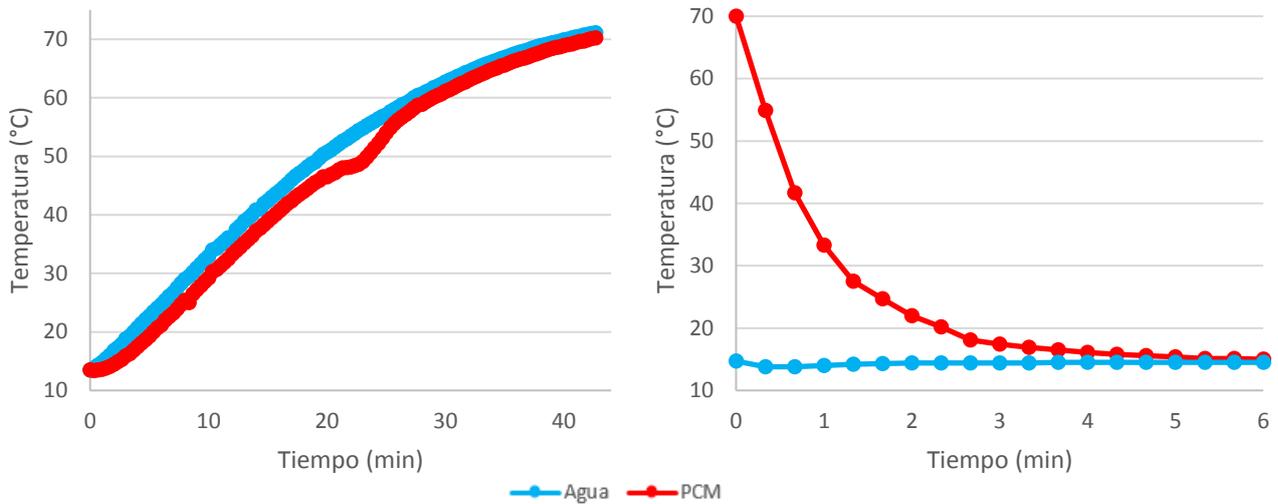


Figura 4-8 Gráficas sodio tiosulfato (2ª medición)

Los resultados en esta medición fueron similares a los obtenidos en la primera medición, sin que el PCM llegue a solidificar de nuevo. La única diferencia destacable ha sido la temperatura de la zona de calor latente de fusión en este caso es mayor que durante la primera medición, encontrándose esta entre 47 y 48°C.

Como resultados de la primera medición del zinc nitrato se han obtenido las siguientes gráficas:

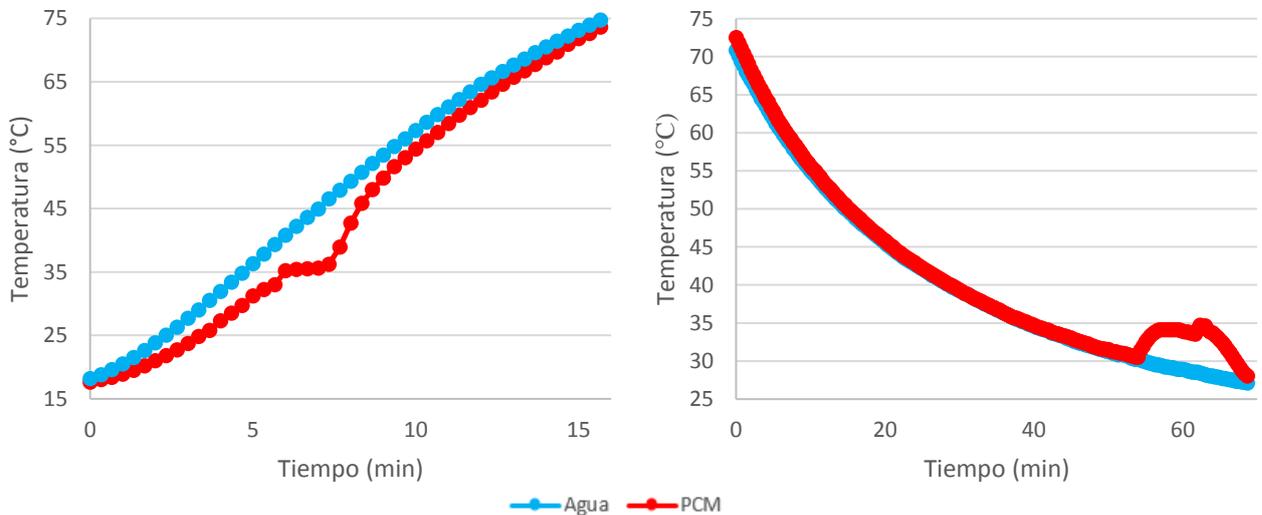


Figura 4-9 Gráficas zinc nitrato (1ª medición)

Al igual que en las mediciones anteriores de otros PCM, la zona de calor latente de fusión queda bien definida entorno a los 35°C durante poco más de un minuto. Este proceso se prolonga durante 17 minutos en total y a diferencia del mismo proceso en el resto de PCM, este es el que se da a menor temperatura de todos ellos. El PCM se funde por completo.

En el caso del enfriamiento, el PCM y el agua donde ha sido calentado se dejan enfriar a temperatura ambiente. A los 56 minutos se produce un aumento de temperatura hasta los 34,1°C que se mantienen constantes durante 3 minutos, volviendo a descender la temperatura otra vez. Este proceso de subenfriamiento se vió afectado probablemente por las vibraciones del soporte, que desencadenaron una

reacción exotérmica que conllevó la solidificación del zinc nitrato (Figura 4-10). El proceso completo duró 70 minutos.



Figura 4-10 Aspecto del zinc nitrato tras su solidificación

Como resultados de la primera medición del zinc nitrato se han obtenido las siguientes gráficas:

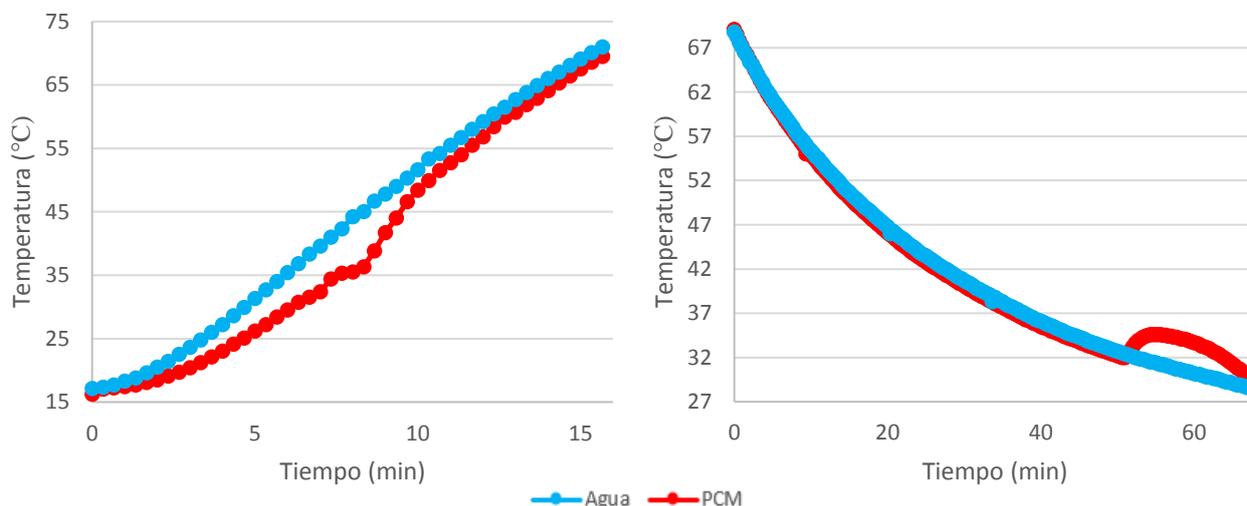


Figura 4-11 Gráficas zinc nitrato (2º medición)

Los resultados en esta segunda medición fueron similares a los obtenidos en la primera.

A continuación se muestra una tabla resumen con las diferentes temperaturas de fusión y solidificación obtenidas:

TEMPERATURAS DE SOLIDIFICACIÓN (°C)			
	Acetato de sodio	Sodio tiosulfato	Zinc nitrato
1º medición	No solidifica completamente	No solidifica	34,1
2º medición	57,5	No solidifica	34,5

Tabla 4-2 Temperaturas de solidificación de los PCM

		TEMPERATURAS DE FUSIÓN (°C)		
		Acetato de sodio	Sodio tiosulfato	Zinc nitrato
Según el fabricante		58	48	36
DSC		68,5	70,2	40,5
Al baño maría	1° medición	58,4	47,4	35
	2° medición	58,3	47,5	35

Tabla 4-3 Temperaturas de fusión de los PCM

A las vistas de estos resultados, las temperaturas de fusión dadas por el fabricante y las obtenidas al baño maría apenas difieren entre ellas pero sí con las obtenidas mediante DSC. La fusión siempre se va a dar entre un rango de temperaturas, puesto que las sustancias empleadas no son puras. Con DSC se considera la temperatura de fusión la del pico máximo del área formada por la línea base y la desviación de esta; o lo que es lo mismo, la sustancia comenzará su cambio de estado a una temperatura menor a la dada como T_f y continuará después de alcanzar esta hasta que este toda la sustancia en estado líquido. Las T_f del fabricante y la obtenida al baño maría son las temperaturas de comienzo de fusión. Con respecto a las temperaturas obtenidas mediante la última técnica, a simple vista únicamente es posible afirmar cuando comienza el cambio de estado, pues no se puede confirmar exactamente cuándo se ha fundido por completo toda la sustancia.

En cuanto a las temperaturas de solidificación, sólo se disponen de las obtenidas del calentamiento al baño maría. Los procesos en los que no llegan a solidificar los PCM son debidos a que el enfriamiento tiene lugar rápidamente y no se produce el fenómeno del subenfriamiento.

4.2 Ensayos a compresión

4.2.1 Ensayos de las probetas pequeñas

Los resultados de los ensayos de las probetas pequeñas se destinaron a crear las diferentes curvas de resistencia del hormigón dependiendo del tipo y cantidad de PCM empleado.

Las dimensiones teóricas de las probetas eran 40 mm de altura y 21,2 mm de diámetro. Por lo general, estas dimensiones se han correspondido con las reales excepto las que se han visto dañadas durante el proceso de extracción del molde. Las roturas durante la extracción se han debido principalmente a que las probetas estaban demasiado húmedas. La mezcla de aceite mineral y vegetal como desmoldeante facilitó dicha extracción. En el *ANEXO VIII* se pueden observar fotografías de las diferentes probetas tras su extracción de los moldes. A continuación, se mostraran varias tablas donde se recogen diversa información de las probetas como sus dimensiones, masa, densidad, resistencia a compresión, etc. Se ha realizado una tabla para las probetas ensayadas a los 4 días, 7 días, 14 días, 21 días y 28 días. Por lo general, los ensayos comienzan a los 3 días pero debido a varias circunstancias tuvieron que realizarse a los 4 días. Además, junto a cada tabla se adjuntan diversas fotografías de las probetas tras la realización de los ensayos. Las siglas N.O. significan que esos datos no fueron observados por diversos motivos.

ENSAYOS A COMPRESIÓN A LOS 4 DÍAS							Observaciones
	Altura (mm)	Diámetro (mm)	Masa (gr)	Densidad (kg/m ³)	Fuerza (kN)	Resistencia (MPa)	
HM	N.O.	N.O.	N.O.	N.O.	2,10	6,01	Poroso - Rotura Satisfactoria
	1%	N.O.	N.O.	N.O.	1,90	5,43	
	2%	N.O.	N.O.	N.O.	2,25	6,43	
ACETATO DE SODIO	3%	N.O.	N.O.	N.O.	0,60	1,72	Pequeñas cavidades externas - Rotura no satisfactoria
	1%	N.O.	N.O.	N.O.	3,30	9,44	
	2%	N.O.	N.O.	N.O.	2,20	6,29	
SODIO TIOSULFATO	3%	N.O.	N.O.	N.O.	1,50	4,29	Rotura satisfactoria
	1%	N.O.	N.O.	N.O.	0,20	0,57	
	2%	N.O.	N.O.	N.O.	0,00	0,00	
ZINC NITRATO	3%	N.O.	N.O.	N.O.	0,00	0,00	No resiste
	2%	N.O.	N.O.	N.O.	0,00	0,00	
	1%	N.O.	N.O.	N.O.	0,00	0,00	

Tabla 4-4 Ensayos a compresión a los 4 días

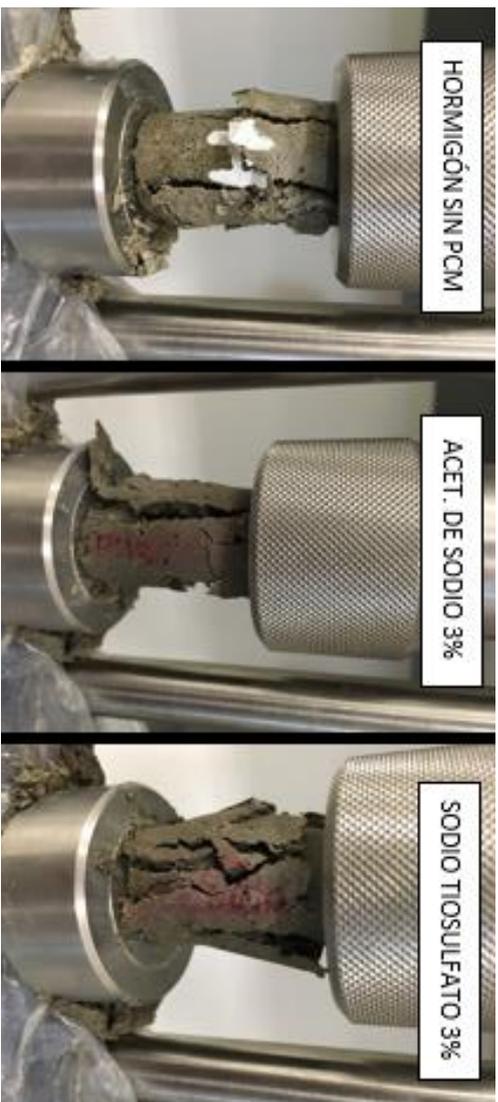


Figura 4-12 Probetas tras los ensayos

ENSAYOS A COMPRESIÓN A LOS 7 DÍAS									
	Altura (mm)	Diámetro (mm)	Masa (gr)	Densidad (kg/m ³)	Fuerza (kN)	Resistencia (MPa)	Observaciones		
HM	40,0	21,0	30,69	2215,22	3,50	10,01	Muchas cavidades externas – Parte con la mano – Cemento ha reaccionado correctamente - Rotura no satisfactoria		
	40,0	21,0	30,72	2217,39	2,60	7,44	Cavidades externas e internas – Rotura no satisfactoria		
	40,0	21,0	30,46	2198,63	2,50	7,15	Aspecto resistente y consistente – Cavidades externas - Rotura satisfactoria		
ACETATO DE SODIO	40,0	21,0	30,00	2165,42	0,80	2,29	Base dañada – Cavidades internas pequeñas – Aspecto frágil (cemento no ha reaccionado correctamente) - Rotura satisfactoria		
	40,0	21,0	31,45	2270,09	3,80	10,87	Cavidades grandes cerca de la base - Rotura no satisfactoria		
SODIO TIOSULFATO	40,0	21,0	32,05	2313,39	2,70	7,72	Cavidades pequeñas externas e internas - Rotura satisfactoria		
	40,0	21,0	30,69	2215,23	1,75	5,00	Muchas cavidades grandes – Cemento no ha reaccionado correctamente - Rotura no satisfactoria		
	40,0	21,0	30,81	2223,89	0,25	0,71	Base dañada – Pequeñas cavidades internas – Poco resistente - Rotura satisfactoria		
ZINC NITRATO	40,0	21,0	29,47	2127,17	0,10	0,29	Base dañada- Interior húmedo – Rompe con la mano - Rotura no satisfactoria		
	40,0	21,0	28,66	2068,70	0,00	0,00	Base dañada- Interior húmedo – Rompe con la mano – Se deshace - Rotura no satisfactoria		

Tabla 4-5 Ensayos a compresión a los 7 días

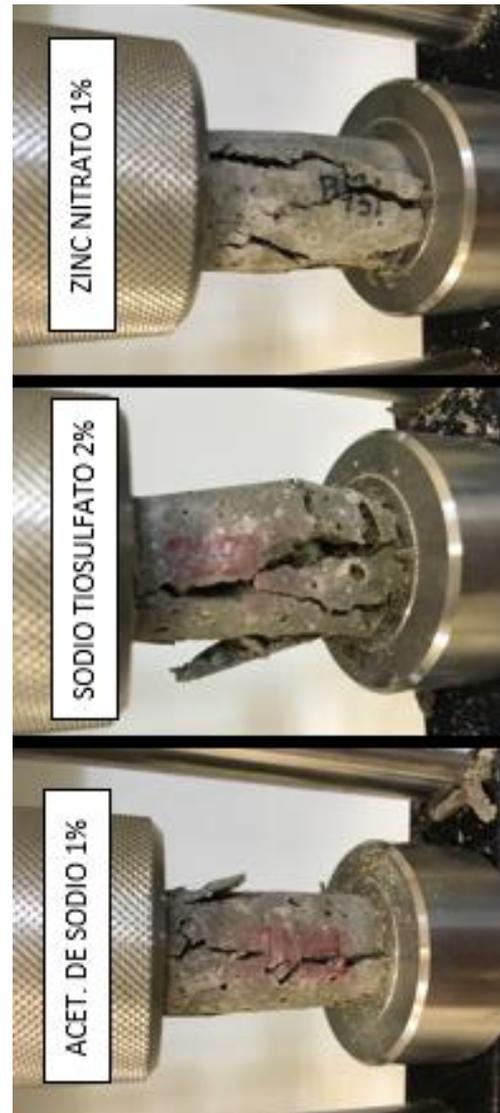


Figura 4-13 Probetas tras los ensayos

ENSAYOS A COMPRESIÓN A LOS 14 DÍAS							Observaciones
	Altura (mm)	Diámetro (mm)	Masa (gr)	Densidad (kg/m ³)	Fuerza (kN)	Resistencia (MPa)	
HM	1%	N.O.	N.O.	N.O.	4,25	12,15	No porosidad – Dura – Consistente - Rotura satisfactoria
		N.O.	N.O.	N.O.	3,00	8,58	Pequeñas cavidades externas – Aspecto consistente - Rotura no satisfactoria - Cemento ha reaccionado correctamente
		N.O.	N.O.	N.O.	3,50	10,01	Cavidades externas - Rotura no satisfactoria
	2%	N.O.	N.O.	N.O.	1,30	3,72	Pocas cavidades externas - Rotura no satisfactoria
		N.O.	N.O.	N.O.	4,75	13,58	Pequeñas cavidades – Porosidad externa – Aspecto consistente - Rotura satisfactoria
		N.O.	N.O.	N.O.	4,10	11,73	Cavidades cerca de la base - Rotura satisfactoria - Dura
	3%	N.O.	N.O.	N.O.	2,00	5,72	Bastante cavidades medianas externas - Rotura no satisfactoria
		N.O.	N.O.	N.O.	1,00	2,86	Cavidades cerca de la base - Rotura no satisfactoria
		N.O.	N.O.	N.O.	0,25	0,71	Pocas cavidades – No porosidad – Poco resistente - Rotura no satisfactoria
ZINC NITRATO	N.O.	N.O.	N.O.	N.O.	0,10	0,29	Base dañada – Poco resistente - Rotura no satisfactoria

Tabla 4-6 Ensayos a compresión a los 14 días

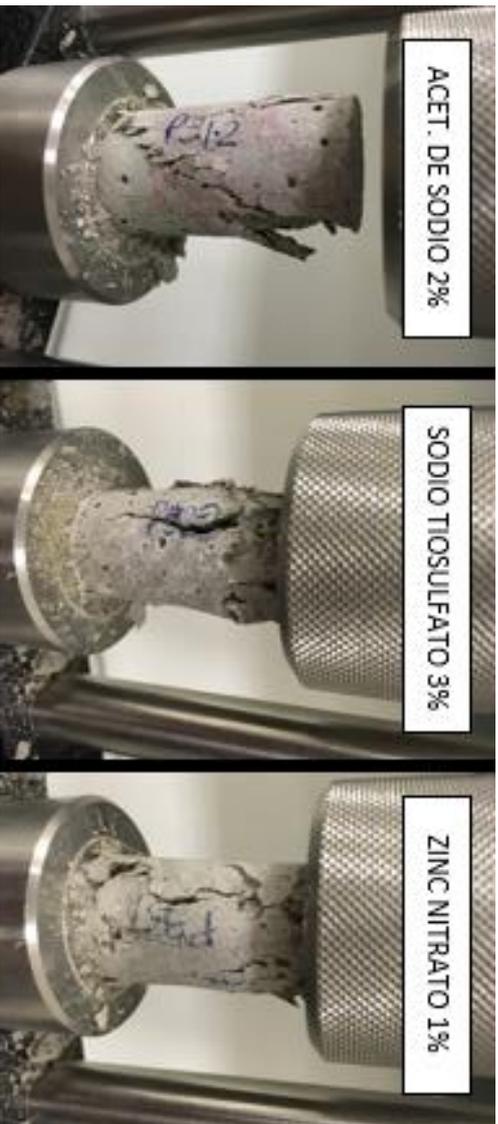


Figura 4-14 Probetas tras los ensayos

ENSAYOS A COMPRESIÓN A LOS 21 DÍAS							
	Altura (mm)	Diámetro (mm)	Masa (gr)	Densidad (kg/m ³)	Fuerza (kN)	Resistencia (MPa)	Observaciones
HM	41,0	21,2	30,93	2137,20	5,50	15,73	Rompe en trozos grandes – Poros externos pequeños – Base poco dañada – Dura y consistente - Rotura no satisfactoria
	40,5	21,2	30,08	2104,12	4,45	12,73	Rompe en trozos grandes – Bastantes cavidades externas – Porosidad interior – Dura y consistente - Rotura satisfactoria
	40,5	21,2	29,54	2066,35	4,80	13,73	Cavidades medianas exterior – Porosidad interna – Dura - Rotura no satisfactoria
ACETATO DE SODIO	41,0	21,2	29,02	2005,22	1,75	5,00	Pocas cavidades grandes externa – Bases dañadas – Cavidades internas grandes - Rotura no satisfactoria
	41,5	21,2	31,25	2133,29	7,00	20,02	Pocas cavidades pequeñas externas – Rotura satisfactoria
	40,0	21,2	30,67	2172,21	5,00	14,30	Pocas cavidades grandes externas – Rompe por la base
SODIO TIOSULFAT	40,0	21,2	28,29	2003,65	2,90	8,29	Muchas cavidades pequeñas externas – Base dañada – Al romper se deshace con la mano - Rotura no satisfactoria
	41,0	21,2	28,15	1945,11	1,10	3,15	Pocas cavidades medianas – Base muy dañada- Porosidad interna – Rompe con la mano - Rotura satisfactoria
	41,5	21,2	30,21	2062,30	0,50	1,43	Poca porosidad externa – Rompe con la mano - Rotura no satisfactoria
ZINC NITRATO	35,0	21,2	24,78	2005,77	0,25	0,71	Base dañada – No resiste

Tabla 4-7 Ensayos a compresión a los 21 días

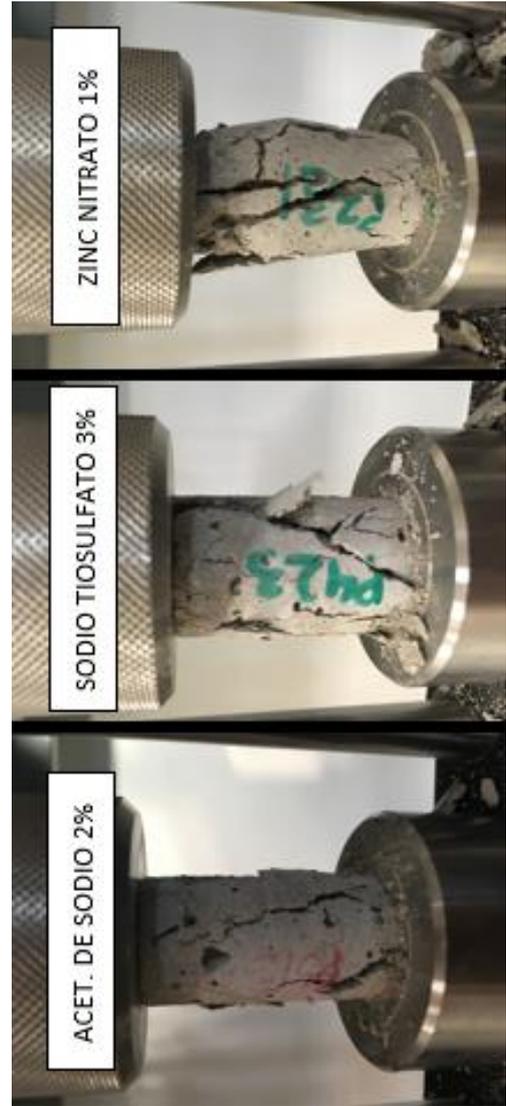


Figura 4-15 Probetas tras los ensayos

ENSAYOS A COMPRESIÓN A LOS 28 DÍAS							Observaciones
	Altura (mm)	Diámetro (mm)	Masa (gr)	Densidad (kg/m ³)	Fuerza (kN)	Resistencia (MPa)	
HM	41,5	21,2	29,76	2056,35	6,00	17,16	Grandes cavidades externas – Rotura satisfactoria Dura y consistente
	41,5	21,2	30,25	2090,21	5,25	15,01	Cavidades externas grandes – Porosidad interior Dura y resistente – Rotura satisfactoria
	41,5	21,2	23,07	1594,09	5,25	15,01	Porosidad interna – Rotura satisfactoria Dura y consistente
ACETATO DE SODIO	41,5	21,2	31,04	2144,80	2,00	5,72	Base muy dañada – Algunas cavidades externas
	41,5	21,2	30,74	2124,07	7,30	20,88	Cavidades externas medianas – Dura y consistente Rotura satisfactoria
	41,5	21,2	27,97	1932,67	5,75	16,44	2 cavidades grandes cerca de la base – Rotura satisfactoria Dura y consistente – Cemento ha reaccionado correctamente
SODIO TIOSULFATO	41,5	21,2	22,24	153,74	3,25	9,29	Grandes cavidades cerca de la base – Porosidad externa Rotura no satisfactoria
	41,5	21,2	28,26	1952,71	1,25	3,57	Base dañada – Rotura no satisfactoria – Porosidad interna
	41,5	21,2	24,43	1688,06	0,50	1,43	Base un poco dañada – Porosidad interna
ZINC NITRATO	4,5	21,2	29,76	2056,35	0,40	1,14	Base dañada – Cemento no reacciona correctamente No resiste – Rotura no satisfactoria

Tabla 4-8 Ensayos a compresión a los 28 días

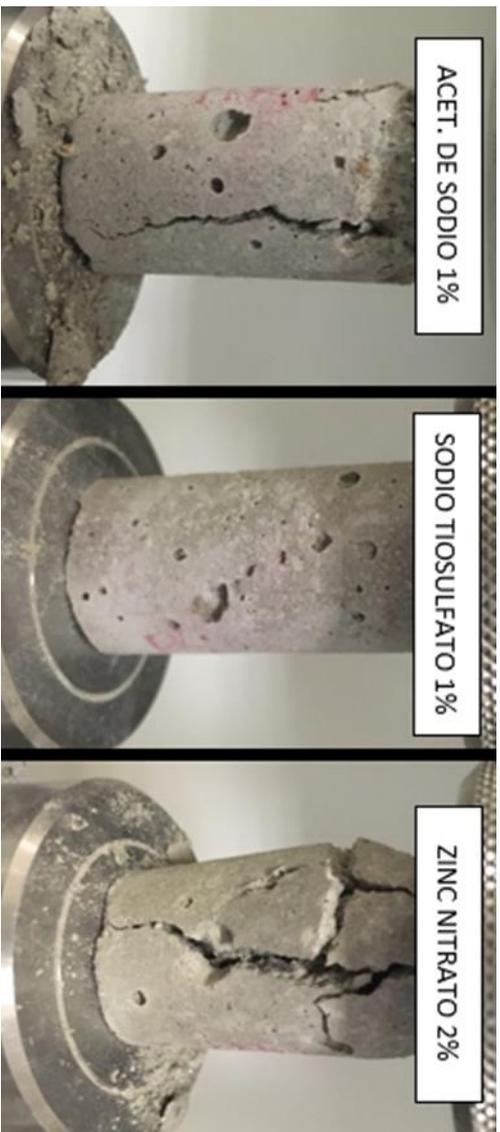


Figura 4-16 Probetas tras los ensayos

Todas las resistencias de las diferentes probetas han sido graficadas para poder comparar los distintos tipos de PCM y los porcentajes añadidos a las mezclas a los 4, 7, 14, 21 y 28 días. De esta forma se han obtenido gráficas según la resistencia medida para cada tipo de PCM y para cada porcentaje; y según el porcentaje de resistencia obtenido en ese tiempo con respecto a los 28 días, también para cada PCM y para cada porcentaje. A continuación, se mostrarán todas las gráficas obtenidas con su correspondiente explicación según el tipo de PCM empleado.

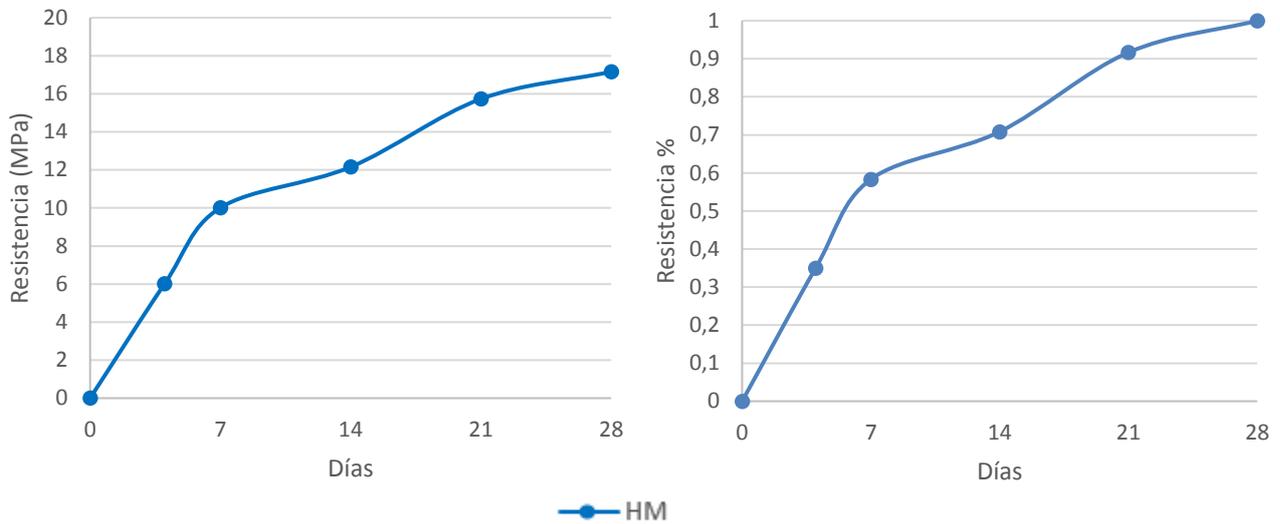


Figura 4-17 Gráficas resistencia del hormigón de muestra (sin PCM)

Las gráficas anteriores (*Figura 4-17*) se corresponden con las del hormigón de muestra sin PCM, el cual se ha utilizado de referencia para comparar con el resto de hormigones que incorporan PCM. La resistencia obtenida a los 28 días fue de 17,16 MPa. Durante los primeros 7 días el hormigón adquiere prácticamente el 60 % de su resistencia total, valor relativamente cercano al 65% estimado por la EHE-08 y que puede ser consultado en la *Tabla 3-6* de este trabajo. Debido a esto, la pendiente de la curva durante los primeros días es mayor, disminuyendo a partir del séptimo día y aumentando la resistencia más lentamente hasta la máxima obtenida a los 28 días.

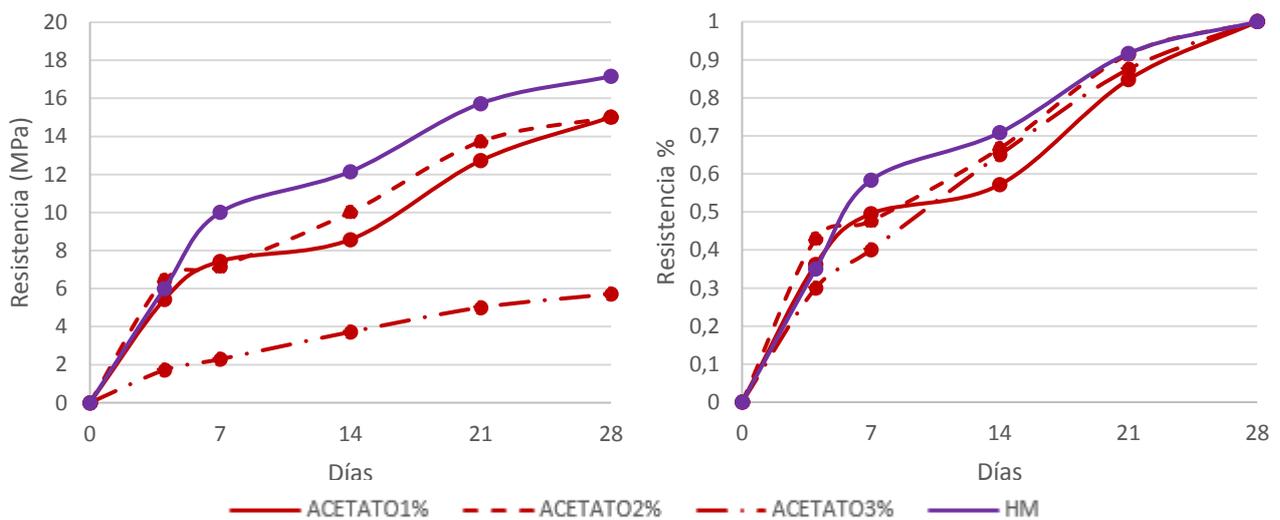


Figura 4-18 Gráficas del acetato de sodio

Estas gráficas (*Figura 4-18*) se corresponden con las del acetato de sodio. Las probetas con 1 y 2% de acetato de sodio han presentado una resistencia similar entre ellas durante los ensayos y entorno a

3MPa por debajo de la resistencia de la probeta de hormigón de muestra sin PCM. Sin embargo, la resistencia de la probeta con un 3% de acetato de sodio está ligeramente por debajo de la mitad de la resistencia de las otras dos. Durante los primeros 4 días el hormigón con los distintos porcentajes de PCM adquiere entre un 30 y un 40% de su resistencia final, siendo estos valores similares a los proporcionados por la EHE-08. El aumento de la resistencia continua hasta los 21 días, donde las probetas presentan un 90% de resistencia. A partir de este momento la resistencia se incrementara más lentamente hasta su máximo. A la vista de estos resultados, se puede afirmar que a partir de la adicción de un 2% de acetato de sodio a la mezcla, la resistencia de la probeta se ve gravemente afectada, reduciéndose esta por debajo de la mitad de la probeta sin PCM.

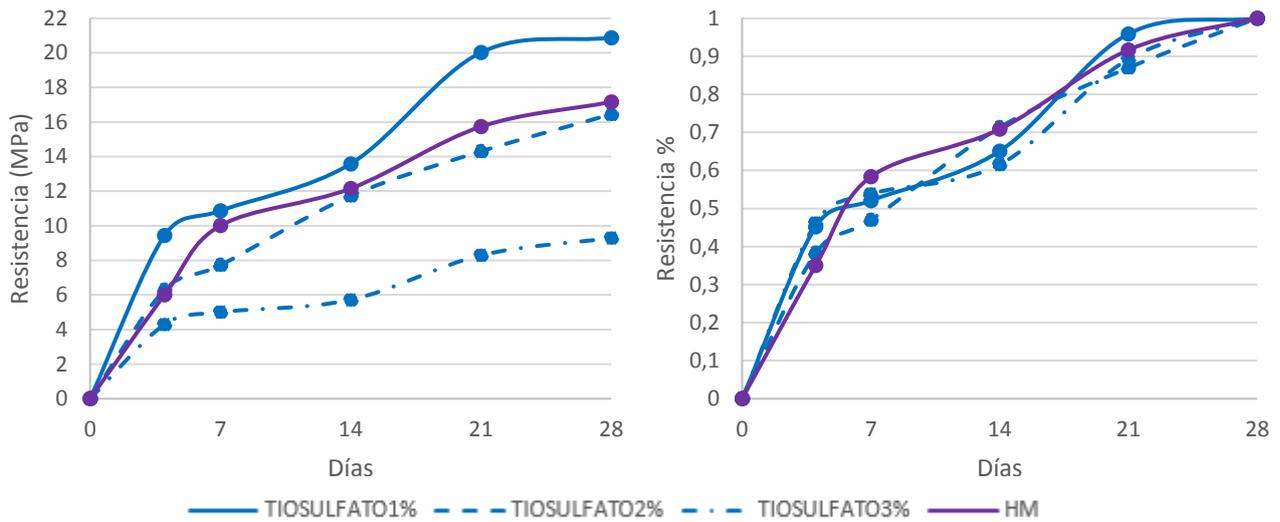


Figura 4-19 Gráficas del sodio tiosulfato

En el caso del sodio tiosulfato (Figura 4-19), la probeta con un 1% en la mezcla presenta una resistencia ligeramente mayor durante todas las mediciones a la del hormigón de muestra. La probeta con un 2% tiene una resistencia prácticamente igual a la de referencia. En cambio, la de un 3% presenta la mitad de resistencia con respecto la de referencia también. En términos de porcentajes de resistencia, las tres probetas con PCM y la de referencia tienen una evolución de su resistencia con respecto a la edad muy similar alcanzando durante los cuatro primeros días entorno al 40% de su resistencia total. A partir del día 21 el crecimiento se estabiliza.

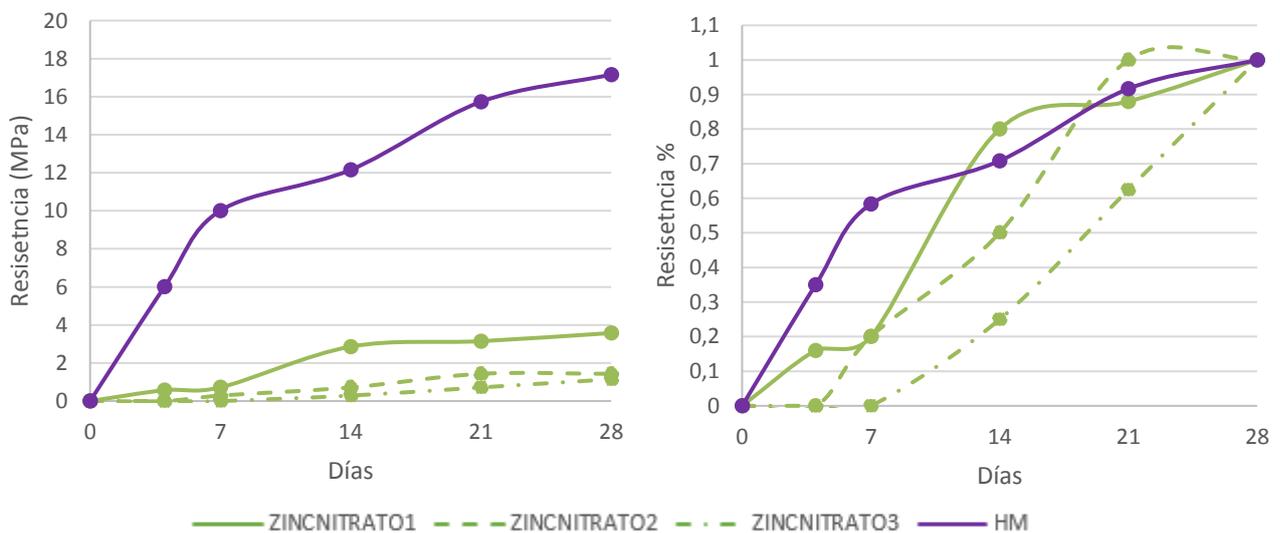


Figura 4-20 Gráficas del zinc nitrato

Como puede observarse en la gráfica de la izquierda (*Figura 4-20*), las probetas con 1% de zinc nitrato soportan menos de un tercio de la resistencia total de la probeta de referencia durante los diferentes días de ensayo. La resistencia con un 2 y un 3% es muy similar, siendo esta muy pequeña. Entre las probetas de zinc nitrato, la probeta con 1% presenta una gran resistencia con respecto a las otras dos, pues triplica a la probeta con un 3% y duplica a la de 2%. Las tres probetas presentan un aumento de la resistencia durante los primeros días bastante bajo. A partir del séptimo día, su resistencia aumenta considerablemente.

A continuación, se mostrarán una serie de gráficas comparando la resistencia para un mismo porcentaje empleado para diferentes PCM:

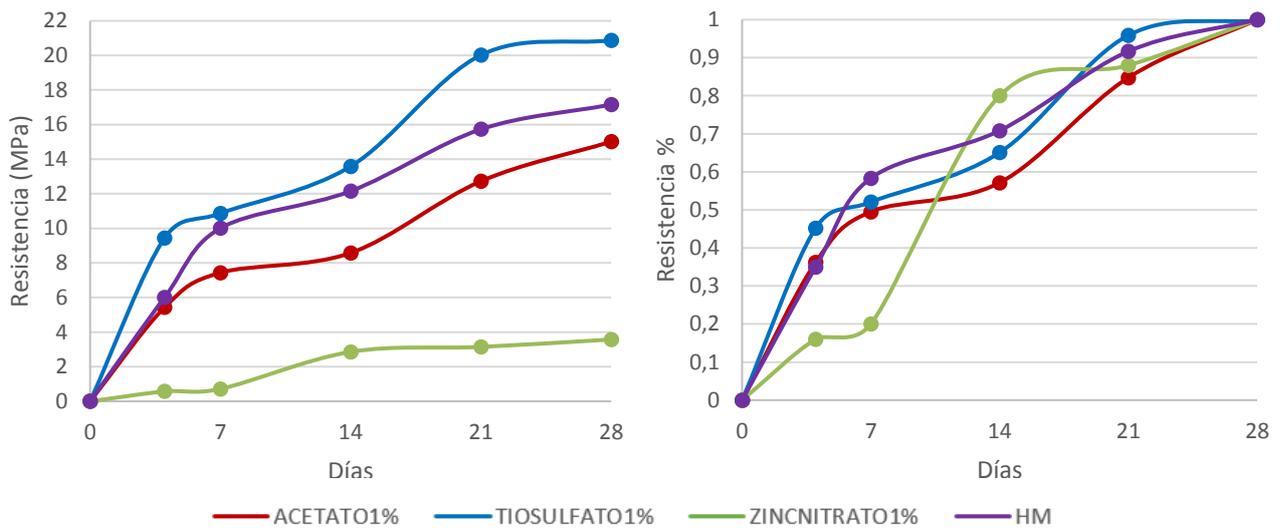


Figura 4-21 Gráficas para un 1% de PCM

En las gráficas anteriores (*Figura 4-21*) se puede observar que tanto el acetato de sodio como el sodio tiosulfato al 1% presentan una resistencia muy superior a la del zinc nitrato al 1%, siendo las resistencias de las probetas de estos dos PCM cercanas a las del hormigón sin PCM en comparación con la del zinc nitrato. En lo referente al porcentaje de resistencia según la edad, la evolución es muy similar entre ellas a excepción del zinc nitrato, que aumenta considerablemente a partir de los 7 días.

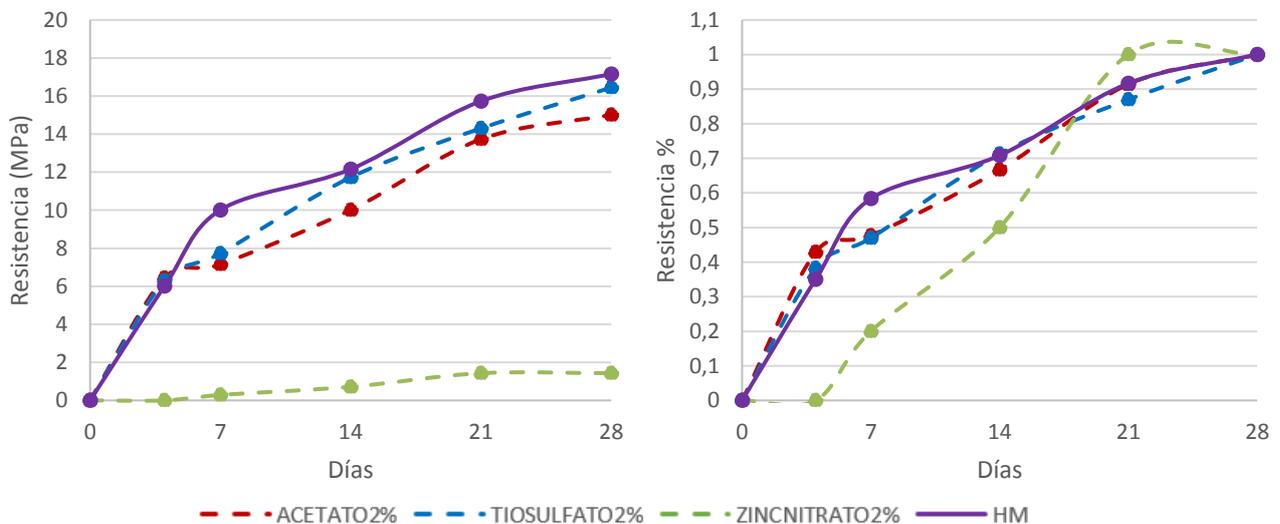


Figura 4-22 Gráficas para un 2% de PCM

Los resultados obtenidos al comparar los diferentes PCM empleando un 2% en la mezcla (*Figura 4-22*) son prácticamente iguales a los descritos anteriormente para la adicción al 1%, a excepción zinc nitrato al 2% comienza a aumentar su resistencia a partir del cuarto día.

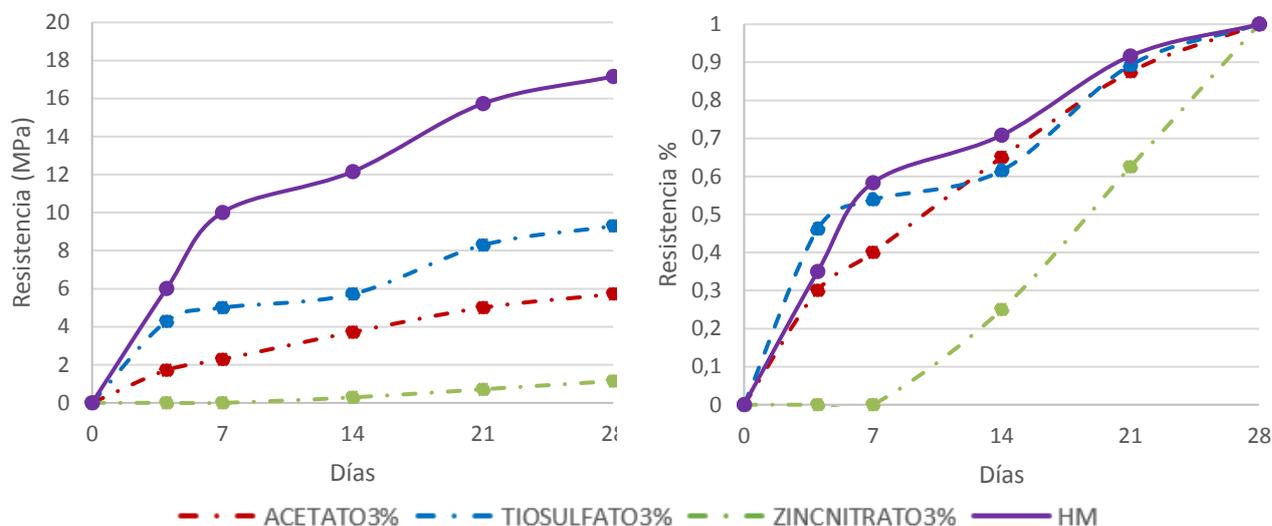


Figura 4-23 Gráficas para un 3% de PCM

Las gráficas anteriores (*Figura 4-23*) ponen de manifiesto que a partir de la adicción de un 3% de cualquiera de los tres PCM empleados en este trabajo la resistencia se ve reducida considerablemente, llegándose a verse gravemente mermada en el caso del zinc nitrato. Aun así, la probeta con 3% de sodio tiosulfato presenta la mitad de la resistencia de la probeta de referencia y el acetato de sodio un tercio de la misma. Al igual que los porcentajes anteriores, todos a excepción del zinc nitrato presentan una evolución similar con respecto al tiempo de curado.

4.2.2 Ensayos de las probetas grandes

Las probetas grandes se realizaron con la intención de complementar a las pequeñas. Para su elaboración se escogió la cantidad de un 1% de PCM para añadir a la mezcla, pues era el que mejores resistencias estaba proporcionando en las probetas pequeñas. Una probeta de cada tipo de PCM junto con una de muestra se utilizó en los ensayos a los 7 días y la otra se empleó para estudiar su conductividad térmica. A la finalización de ese estudio se procedió a realizarles los ensayos de dureza y compresión a los 21 días. Los resultados de los ensayos a compresión con estas probetas confirmaron que tanto el acetato de sodio como el sodio tiosulfato presentan una resistencia bastante próxima a la del hormigón sin PCM. En la *Tabla 4-9* se especifican los resultados obtenidos de las mismas. Las letras N.O. significan “No observado”, y se debió a que no se pudieron realizar estos ensayos porque se rompieron durante los ensayos con el esclerómetro. En la *Figura 4-24* se puede observar algunas fotografías tomadas tras los ensayos.

		ENSAYOS A COMPRESIÓN							
		Edad (días)	Altura (mm)	Diámetro (mm)	Masa (gr)	Densidad (kg/m ³)	Fuerza (kN)	Resistencia (MPa)	Observaciones
ACETATO DE SODIO 1%	1	21	87	48,5	354,86	2207,88	19,20	10,39	Cavidades externas medianas Porosidad interior Rotura satisfactoria Dura y consistente
	2	7	87	48,5	356,86	2220,32	17,50	9,47	Porosidad exterior
SODIO TIOSULFATO 1%	1	21	87	48,5	354,41	2205,08	16,25	8,79	Cavidades externas medianas Porosidad interior Rotura satisfactoria
	2	7	87	48,5	361,72	2250,56	17,30	9,36	Rotura satisfactoria Porosidad exterior
ZINC NITRATO 1%	1	21	87	48,5	331,88	2064,90	N.O.	N.O.	Se rompe durante el ensayo con el esclerómetro
	2	21	87	48,5	N.O.	N.O.	0,80	0,43	Cemento no ha reaccionado en el interior Poco resistente
HORMIGÓN SIN PCM (HM)	1	7	87	48,5	355,03	2208,93	N.O.	N.O.	Se rompe durante el ensayo con el esclerómetro
	2	21	87	48,5	348,88	2170,67	19,10	10,33	Cavidades externas medianas Rotura satisfactoria

Tabla 4-9 Resultados ensayos probetas grandes

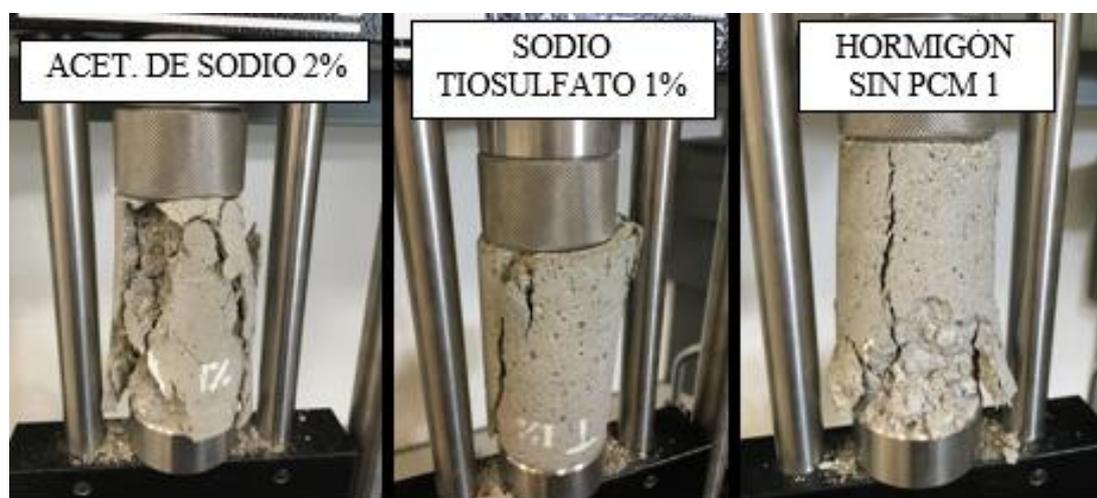


Figura 4-24 Probetas tras los ensayos

4.3 Ensayos de dureza

Con respecto a los ensayos de dureza, las probetas pequeñas fueron descartadas puesto que el impacto del durómetro las rompía. Estos ensayos se efectuaron a las probetas a las cuales se les había estudiado la conductividad térmica, puesto que eran las únicas existentes en el momento del ensayo. Se les realizó la prueba antes del ensayo de compresión, ya que este último las rompería e impediría el ensayo de dureza. Por las dimensiones de las probetas fue imposible realizar las pruebas a una distancia de 25 mm con respecto a otra anterior y con respecto al borde como fija la norma. Además, únicamente se realizaron 5 mediciones para evitar deteriorarlas y poder realizar los ensayos a compresión posteriormente. Cabe destacar que el durómetro es manipulado por otros alumnos durante la realización

de sus prácticas, lo cual explica que a menudo no funcione correctamente. Los índices de rebote obtenidos que eran muy pequeños se descartaron. A continuación se muestra una tabla con los resultados obtenidos de estas pruebas:

	ENSAYO DE DUREZA			Resistencia ensayo a compresión (MPa)
	Índice de rebote	Media	Resistencia (MPa)	
HORMIGÓN SIN PCM	24/26/28/ 16/20	23	15,69	10,33
ACETATO DE SODIO 1% (1)	22/23/20/ 19/22	21	13,23	10,39
SODIO TIOSULFATO 1% (1)	15/28/19/ 22/24	22	14,21	8,79
ZINC NITRATO 1% (2)	No resiste	No resiste	No resiste	0,43

Tabla 4-10 Resultados ensayos de dureza

A la vista de estos resultados, se observa que los valores de resistencia obtenidos con el durómetro son mayores a los obtenidos mediante los ensayos de compresión. Se debe destacar que el durómetro solo es posible obtener la resistencia cercana a la superficie. Además, las pequeñas dimensiones de las probetas donde se realizaron los ensayos y la manipulación del aparato por otros alumnos aconsejan en futuros estudios emplear otro equipo o verificar éste.

4.4 Estudio de la variación de la cantidad de agua en las probetas

En las probetas grandes y antes de la realización del resto de ensayos, se llevó a cabo el análisis de la cantidad de agua que era posible que las probetas perdiesen pasadas 24 y 48 horas. Estas probetas fueron hidratadas previamente sumergiéndolas completamente en agua durante las 24 horas antes del estudio. Transcurridas estas 24 horas, se secaron y se pesaron. Transcurridas otras 24 y 48 horas, se volvieron a pesar para poder medir la variación de agua que habían evaporado. En este aspecto, las probetas con mayor porosidad debían poder absorber el agua con mayor facilidad. Otro aspecto observado y relacionado con la humedad de las probetas fue que durante los ensayos a compresión, estas rompían antes por las zonas de mayor humedad. Estas zonas se correspondían con las partes que habían estado sumergidas a una mayor profundidad puesto que el agua había ejercido una mayor presión. Aunque no fue objeto de estudio, hubiera resultado interesante analizar en qué grado afecta esta hidratación al PCM, pues los estudiados en este trabajo se correspondían con sales pudiendo llegar a verse afectados. En relación a esto, se observa de la *Figura 4-25*, que el zinc nitrato es el que sufre una mayor variación de la humedad, lo cual puede influir que este sea el PCM que menos resistencia soporte de los estudiados. El resto de PCM tienen unos valores similares, a excepción de la probeta 1 del acetato de sodio al 1%, que presenta una mayor variación que el resto pero sin llegar a ser tan grande como en el caso del zinc nitrato.

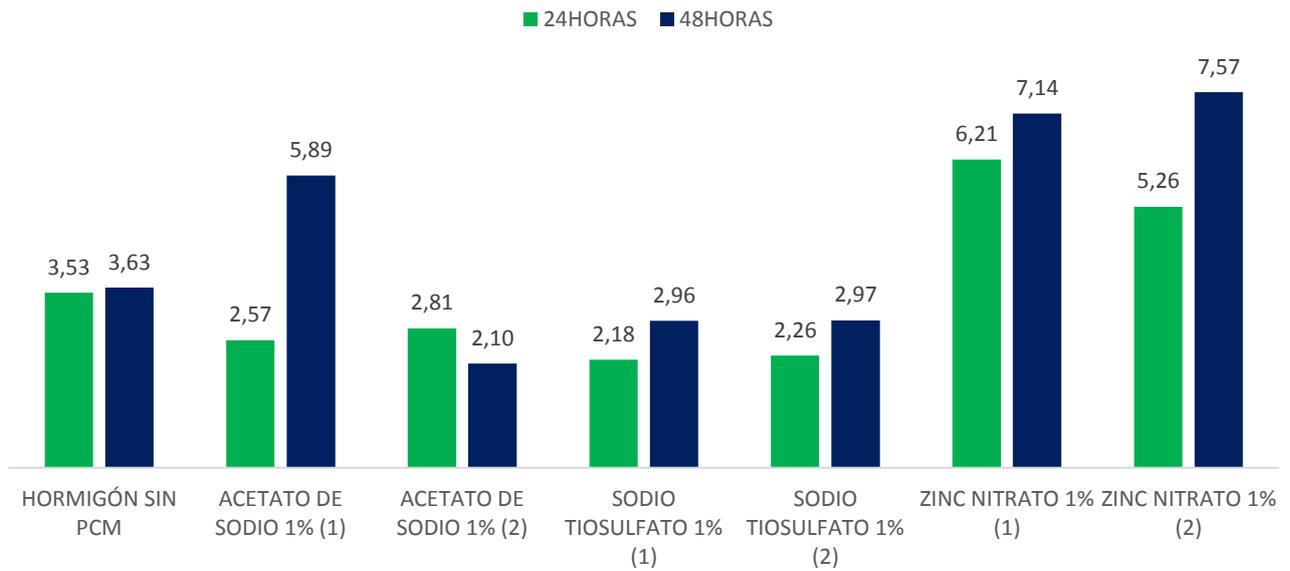
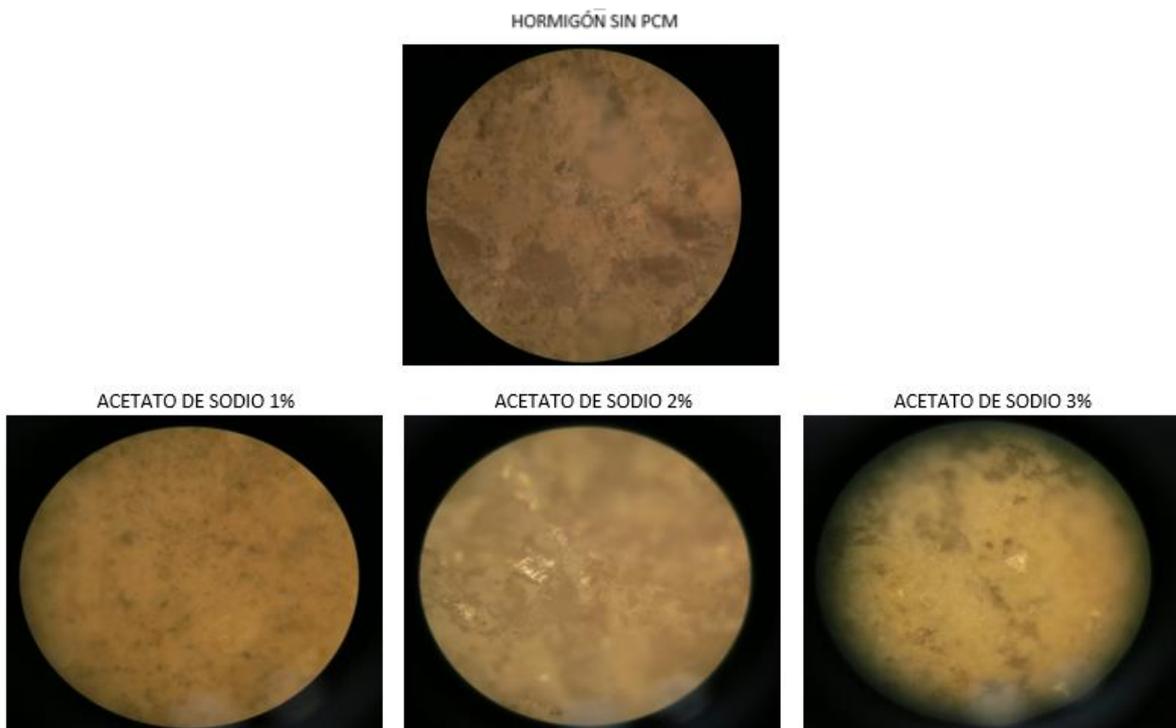


Figura 4-25 Variación de la cantidad de agua en las probetas (gr)

4.5 Análisis de los fragmentos de las probetas

Tras la realización de los ensayos de compresión se procedió al análisis de los fragmentos de las probetas rotas. Durante las diferentes tablas de las probetas mostradas anteriormente, se han especificado algunos datos obtenidos tras el análisis visual de las mismas como pueden ser el tipo de rotura o la porosidad interior. Además, se intentó analizar dichos fragmentos con el microscopio disponibles en el laboratorio, que aunque está pensado para metales puede facilitar el análisis de los trozos para encontrar posibles diferencias entre los distintos hormigones con PCM. A la dificultad de que el microscopio no sea específico para hormigones, se añadió que los fragmentos examinados tenían muchas superficies irregulares lo que dificultaba, más si cabe, el estudio de los mismos. A continuación se adjuntan una serie de fotografías realizadas:



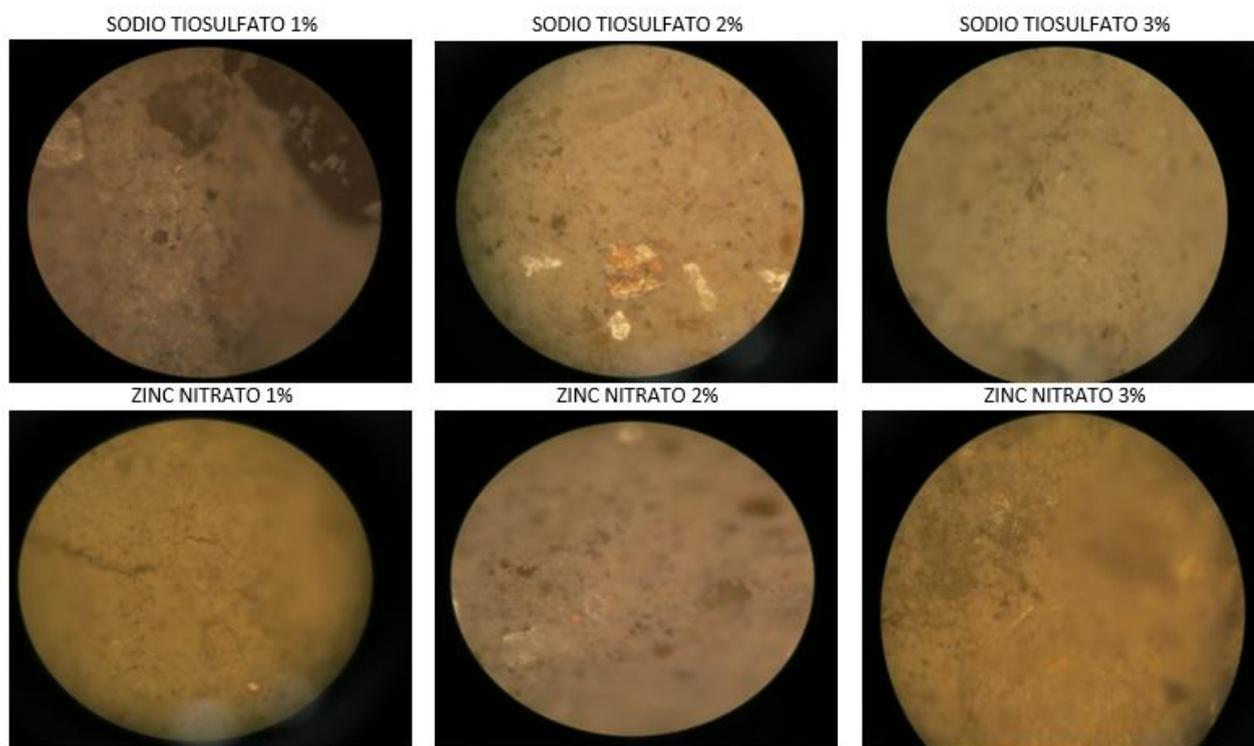


Figura 4-26 Vistas de los fragmentos de las probetas a través de microscopio

De las fotografías anteriores se pueden observar los poros originados por el aire en el interior de las probetas durante su fase de curado. En concreto, en las probetas que contienen un 1% y un 3% de acetato de sodio y la que contiene un 2% de zinc nitrato se puede apreciar una serie de pequeñas manchas oscuras que corresponden con dichas cavidades. Las manchas más grandes se deben a partículas de cemento no hidratadas. También es posible detectar los áridos que las conforman dichas probetas, apreciándose estos fácilmente en las imágenes del acetato de sodio 2% y sodio tiosulfato 1 y 2%. En la imagen del zinc nitrato 1% se pueden apreciar microfisuras causadas por la sobrecarga a la que fue sometida la probeta durante los ensayos a compresión. Debido a la falta de un microscopio adecuado para este tipo de material, prácticamente todas las imágenes presentan el mismo aspecto, a excepción de lo comentado anteriormente.

4.6 Estudio de la conductividad térmica de las probetas

Como se comentó anteriormente en el apartado 3.3.6, las probetas estuvieron conectadas a un foco caliente durante 7 días aproximadamente 12 horas cada día. En un primero momento las cajas se encontraban cerradas completamente, pero durante el primer día de medición los sensores que se encontraban en el interior registraron un pico de temperatura cercano a los 90°C. Según el fabricante, el poliestireno extruido tiene limitada su máxima temperatura a 75°C, la cual es bastante inferior con respecto al pico alcanzado. De hecho, al día siguiente cuando se procedió al encendido de las bombillas se pudo comprobar como parte del material que formaba el aislante se había contraído y descompuesto. Además, dicha temperatura es muy superior a la que puede alcanzar un elemento construido en hormigón en condiciones normales. Por todo ello y ante el peligro de un posible incendio, se decidió que en la parte superior hubiera una parte descubierta para impedir que se alcanzasen temperaturas tan elevadas. En concreto la apertura estuvo abierta con un ancho de 5cm. A partir de entonces las temperaturas máximas alcanzadas se localizaban entre los 30 y 40°C. Se han representado los datos correspondientes a 5 días de ensayos. Lo importante de este ensayo es el estudio de la variación de temperatura entre las superficies de hormigón sobre la que incide la bombilla y las superficies que se encuentran situadas en el exterior de la caja.

Mediante el adaptador específico, la información de los sensores fue volcada a un ordenador. Para ello fue necesario instalar un software gratuito de la página www.maximintegrated.com llamado OneWireViewer. Este programa, de fácil e intuitivo manejo, permitió extraer las mediciones de los sensores (Figura 4-27). También proporciona la visualización de las mismas mediante una gráfica, aunque para mayor comodidad se optó por emplear una hoja de cálculo de Excel para graficar los resultados.

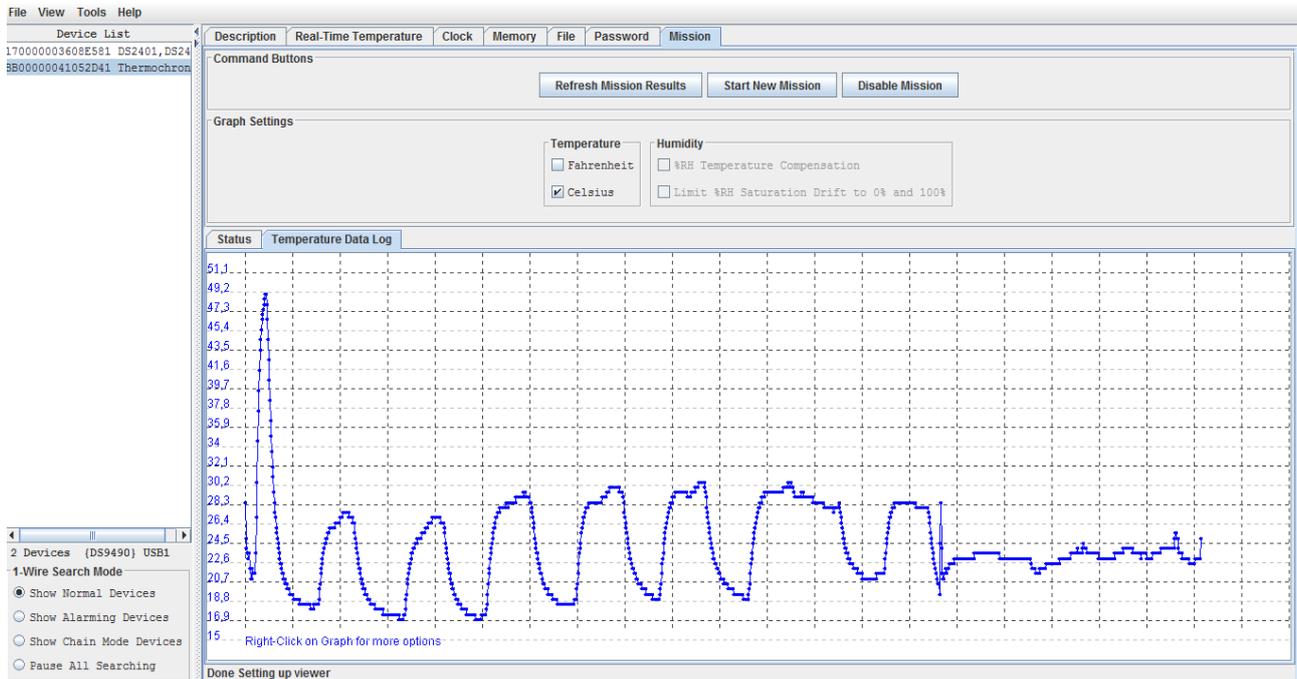


Figura 4-27 Interfaz software iButton

A continuación, se exponen una serie de gráficas que serán comentadas posteriormente. El parámetro de la humedad del aire fue descartado a la hora de su inclusión en las mismas debido a que carecía de sentido para el fin último del ensayo.

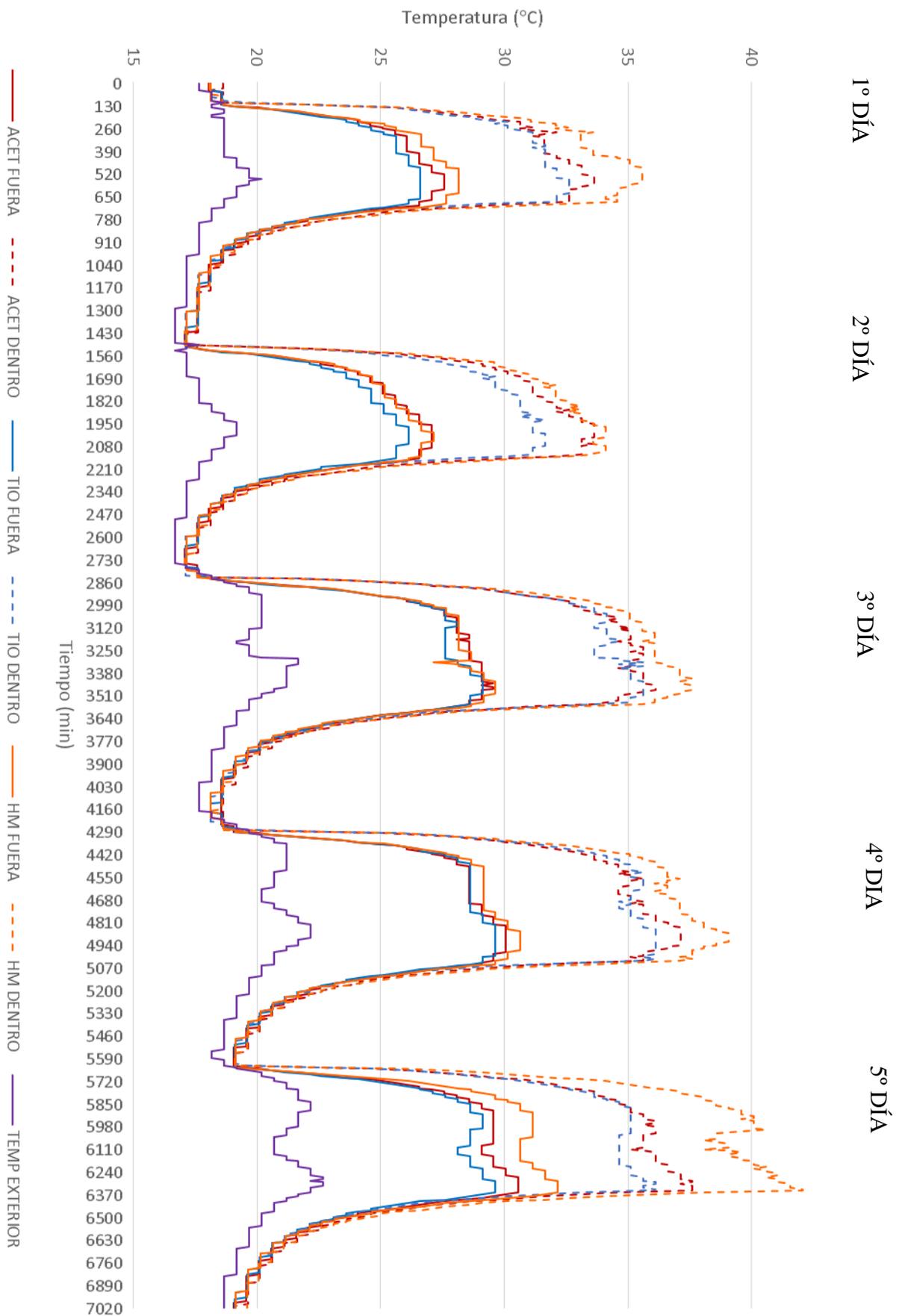


Figura 4-28 Gráficas de las temperaturas de todos los sensores

En la *Figura 4-28* se representan los resultados de los siete sensores empleados para el ensayo. Se puede apreciar fácilmente los períodos de 12 horas, aproximadamente coincidentes con el período diurno, en el que estuvieron funcionando los focos de calor, pues las temperaturas de todos los sensores de las cajas aumentan con respecto a la temperatura exterior ambiente de referencia. Los tres últimos períodos registran en general unas temperaturas mayores debido principalmente al incremento de la temperatura ambiente esos dos días. Al comienzo de cada período, las temperaturas de los sensores aumentan de forma gradual haciéndolo primero las del sensor del interior de la caja. Una vez se alcanza la temperatura máxima en los sensores internos como externo, esta se mantiene relativamente estable hasta que se apagan las bombillas. Es en este momento, en el que tanto las temperaturas del interior como las del exterior de la caja se igualan rápidamente con la temperatura ambiente de referencia debido a que la caja está abierta unos 5cm. Las temperaturas registradas por los sensores del interior de cada caja son mayores que las del exterior, pues estas se ven sometidas al calor producido por el foco caliente. Dicho calor se transmite por toda la probeta, la cual se encuentra aislada excepto por los extremos, siendo registrado el valor de la temperatura en el sensor situado en el extremo opuesto de la probeta. Esta temperatura, lógicamente, es menor que la del interior de la caja pero sigue siendo superior a la del sensor de referencia. Las temperaturas de los sensores exteriores de las probetas se encuentran aproximadamente a la mitad entre las temperaturas del interior de las cajas y la de ambiente de referencia.

En la gráfica también se puede observar que las temperaturas interiores alcanzadas por las probetas con PCM son más bajas que las que se registran con la probeta sin PCM. Esto se debe principalmente a que parte de la energía en forma de calor que incide sobre ellas se destina para la fusión del PCM.

En las figuras 29, 30 y 31 se muestran las curvas con las temperaturas de ambos extremos de las probetas y las del sensor a temperatura ambiente de referencia para cada uno de los tipos de PCM.

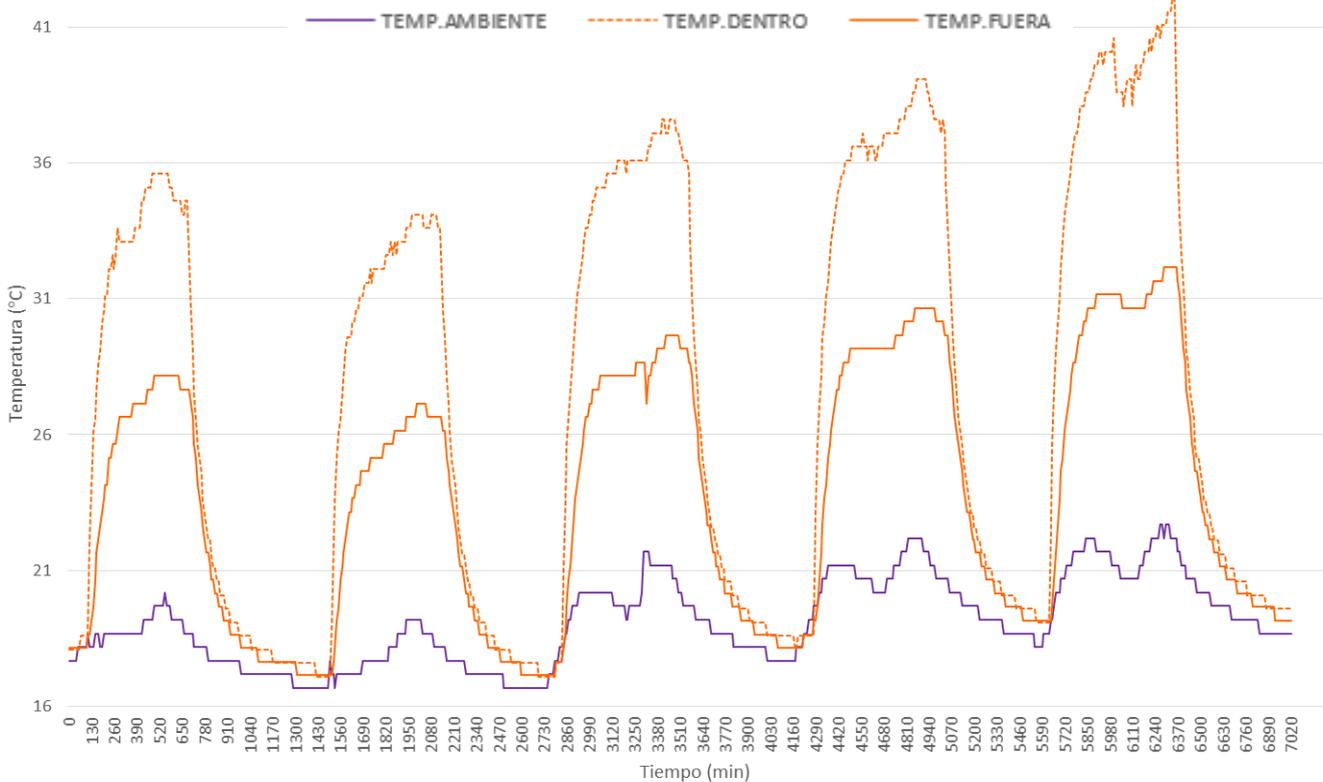


Figura 4-29 Gráficas temperaturas sensores probeta de hormigón sin PCM

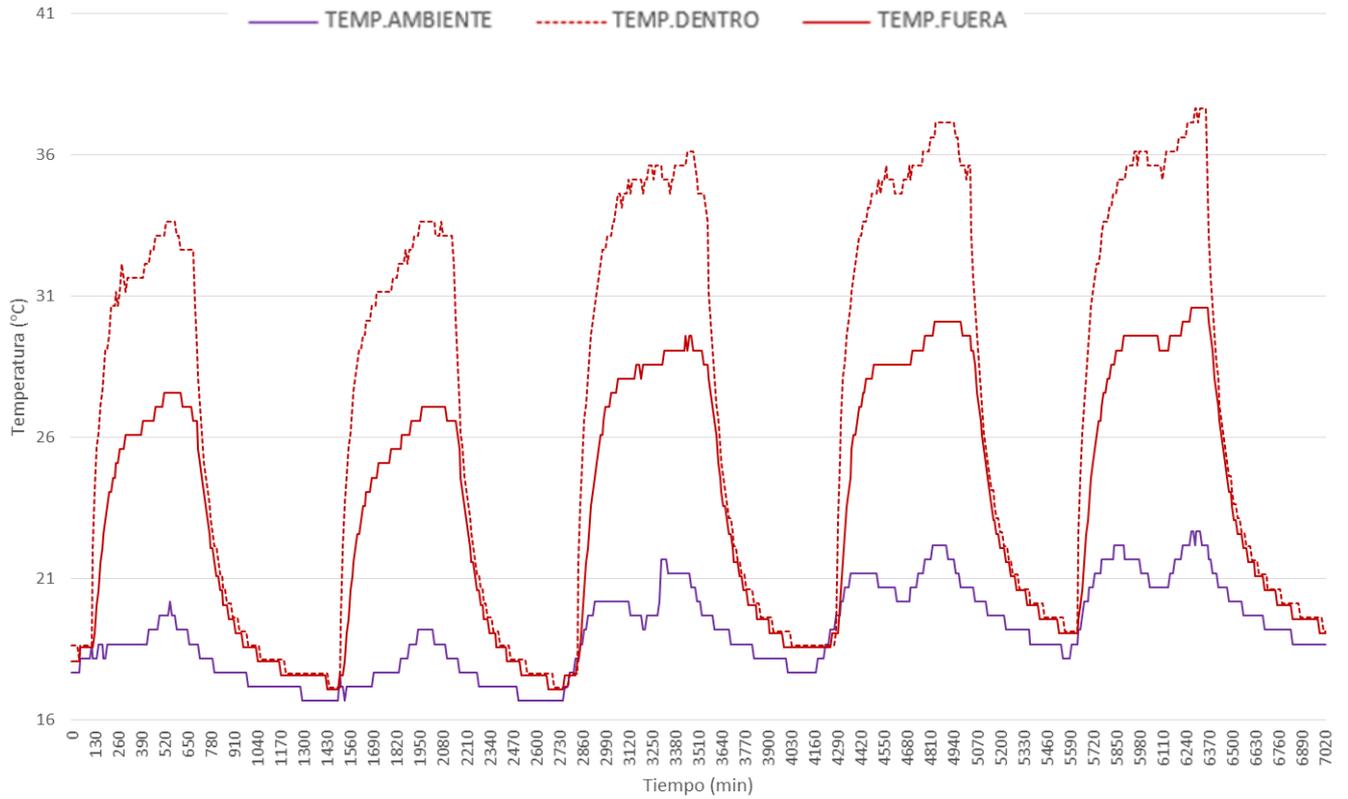


Figura 4-31 Gráficas temperaturas sensores probeta con acetato de sodio 1%

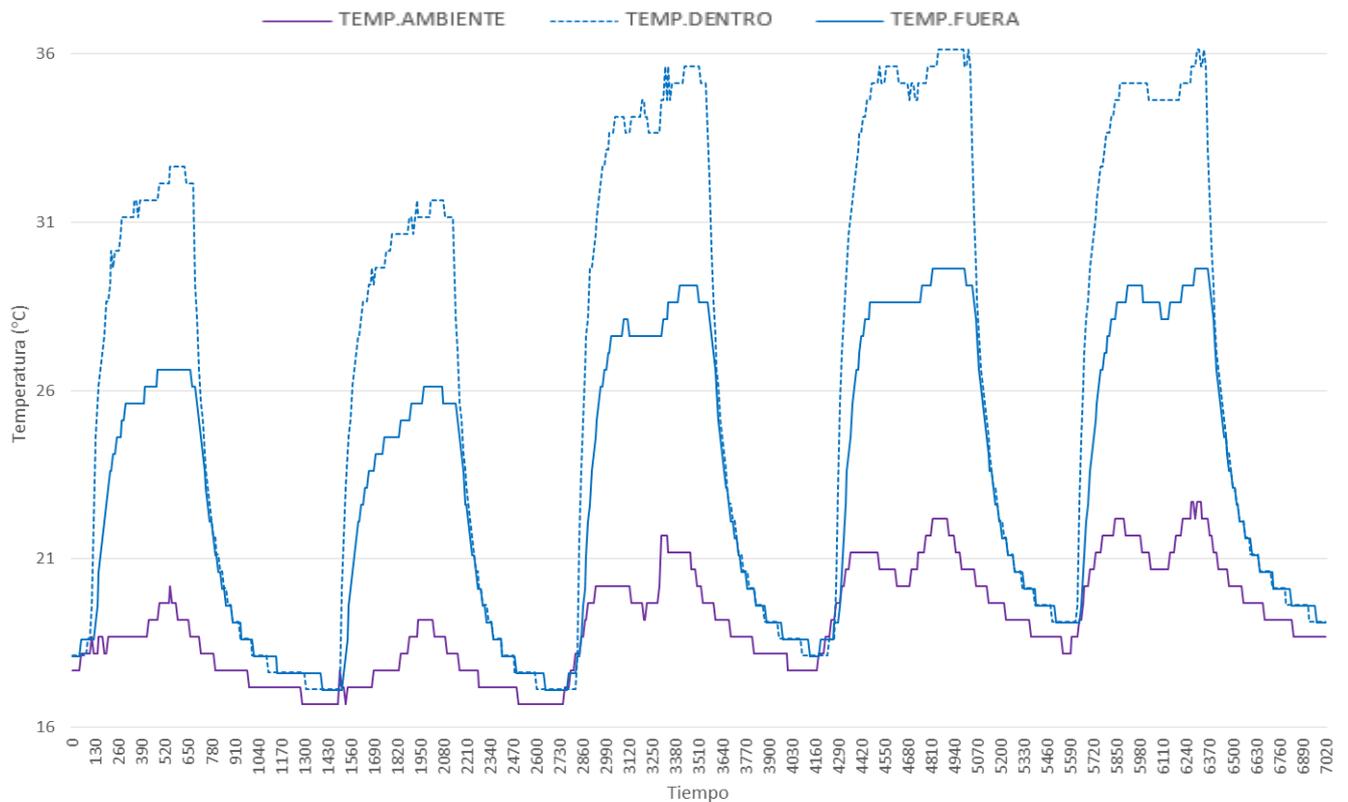


Figura 4-30 Gráficas temperaturas sensores probeta con sodio tiosulfato 1%

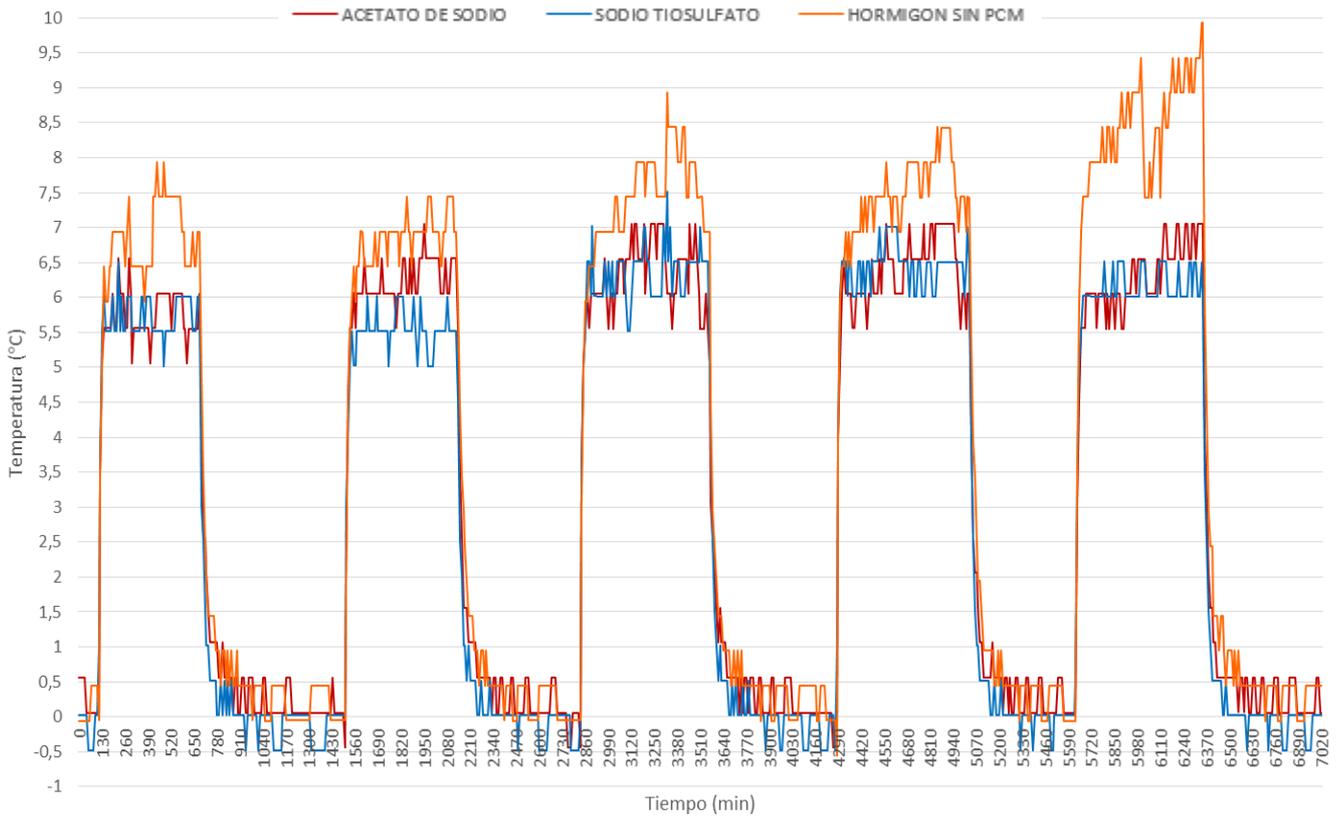


Figura 4-32 ΔT entre los sensores del exterior e interior en contacto con las probetas

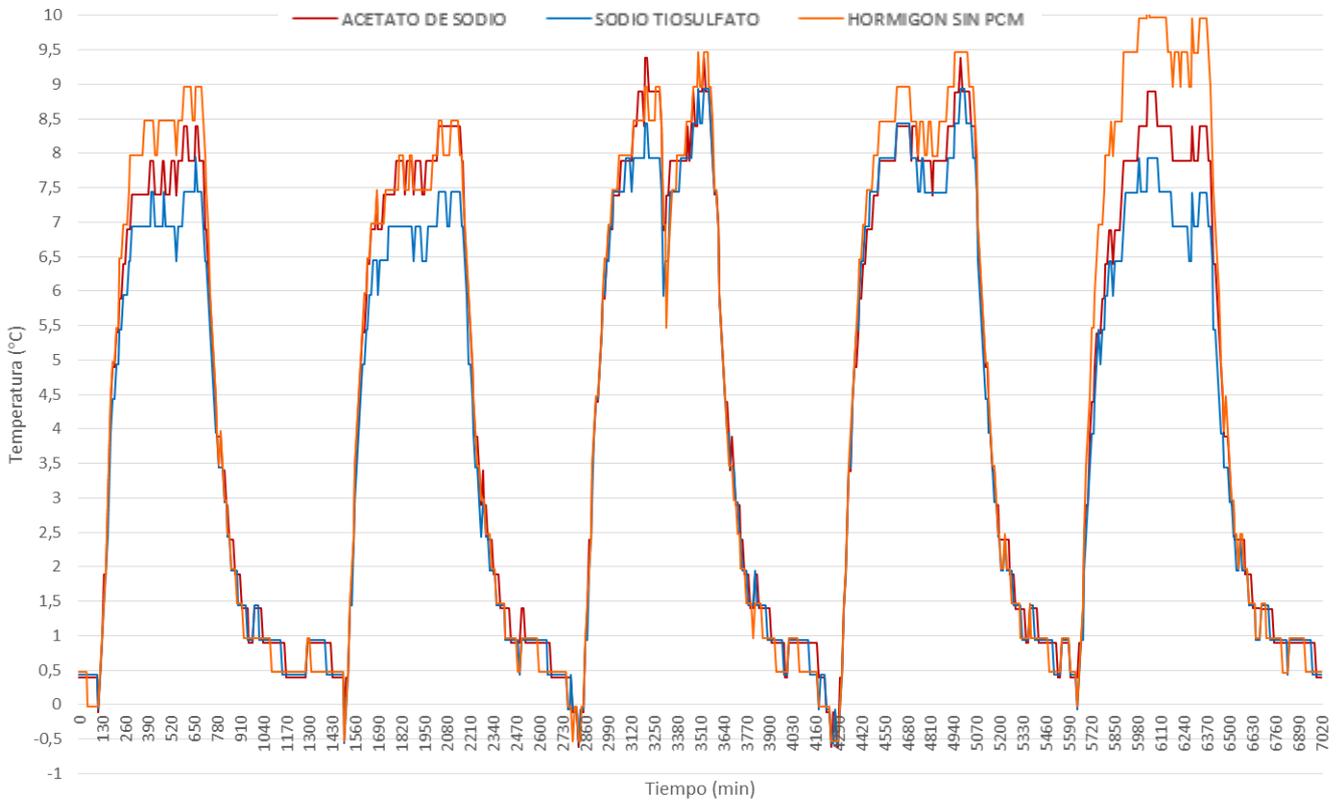


Figura 4-33 ΔT entre los sensores del exterior en contacto con las probetas y el sensor de referencia

La gráfica de la *Figura 4-32* representa las diferentes curvas con la variación de temperatura entre el interior y el exterior de cada una de las probetas. Se observa que las mayores variaciones corresponden, como era de esperar, con las de la probeta de hormigón sin PCM (superiores a 7°C). Para un mismo tamaño de probetas, esta es la que presenta una menor inercia térmica, siendo necesario aumentar sus dimensiones para obtener la misma inercia que el resto de probetas que incluyen PCM. Es dicho PCM el que evita tener que aumentar las dimensiones posibilitando el aumento de la inercia térmica y el consiguiente confort en el interior de la instalación donde se emplee. En la gráfica, las diferencias entre las variaciones de temperatura de las probetas sin PCM y las de con PCM se encuentran entre 0,5 y 1°C, aumentando durante el quinto período. Entre las probetas con PCM, la que mejores resultados presenta es la de sodio tiosulfato pues sufre menores variaciones de temperatura. El aumento de la inercia térmica permite amortiguar las temperaturas reduciendo los picos de las temperaturas máxima y mínima.

La *Figura 4-33* muestra las diferencias de temperaturas (ΔT) entre los sensores exteriores en contacto con el hormigón y el de referencia. En general, el sodio tiosulfato es el que presenta una menor diferencia de temperatura con respecto a la temperatura ambiente.

En resumen, de las gráficas anteriores se deduce que ambos PCM reducen la oscilación térmica en el hormigón, con el consiguiente aumento de la capacidad de conservar la energía recibida. O lo que es lo mismo, de la inercia térmica, y la posibilidad de una mejora en la eficiencia energética de la instalación que los utilice.

Entre los PCM destaca el sodio tiosulfato 1% por tener una mayor capacidad de absorción debido a que sus variaciones de temperatura entre los extremos de las probetas son menores (entre los 5,5 y 6°C) que las del acetato de sodio 1% (entre los 6 y 6,5°C). Además, este último es el que menos diferencia con respecto al sensor de referencia presenta.

Como también se mencionó en el apartado 3.3.6, también se calcularon una serie de parámetros térmicos que pudieran establecer posibles diferencias entre el empleo de las diferentes probetas utilizadas. Para ello se escogieron los valores obtenidos del tercer día de mediciones. A continuación, se van a nombrar y explicar brevemente cada uno de los parámetros calculados y mostrar los resultados:

PARÁMETROS	UNIDADES	DESCRIPCIÓN	FORMULA
Cantidad de calor (Q)	J	Cuantificación de la energía que cede o absorbe el objeto en cuestión dependiente de su masa y variación de temperatura	$Q = m * Ce * \Delta T$
Calor específico (Ce)	$\frac{J}{kg \cdot K}$	Cantidad de energía que es necesaria suministrar a una unidad de masa para que esta incremente una unidad su temperatura	Valor extraído de tablas para este trabajo
Capacidad calorífica (C)	$\frac{J}{K}$	Cantidad de energía necesaria para elevar en una unidad la temperatura de una determinada cantidad de sustancia	$C = Ce * m$
Conductividad térmica	$\frac{W}{m \cdot K}$	Cuantifica la cantidad de energía, en forma de calor, que es capaz de transferir un material por conducción	$\lambda = \frac{\dot{q}}{ \nabla T }$
Resistencia térmica	$\frac{m^2 \cdot K}{W}$	Cuantifica la capacidad de oposición de un material al paso de un flujo de calor a través de él	$R = \frac{e}{\lambda}$

Tabla 4-11 Parámetros térmicos

El calor específico del hormigón empleado para los cálculos fue extraído de [44] siendo este de 1000J/(kg·K). Las variaciones de temperaturas se corresponden con las variaciones medias de cada una de las probetas durante el tercer día durante las 12 horas que estuvo encendida la bombilla suministrando calor. El flujo de calor se calculó con la cantidad de calor del tercer día para un área circular con radio de 0,0242 m (radio de la probeta) y un tiempo de 12 horas (período de encendido) y el gradiente de temperaturas con una distancia de 0,087 m (altura de la probeta). A continuación, se muestra una tabla con los resultados obtenidos:

PROBETA	MASA (kg)	DENSIDAD (kg/m³)	ΔT (K)	Ce (J/kg·K)	C (J/K)	Q (kJ)	λ (W/m·K)	R (m²·K/W)
HORMIGÓN SIN PCM	0,349	2170,670	4,57	1000	349	1,594	0,380	0,229
ACETATO DE SODIO 1%	0,355	2207,880	4,49	1000	355	1,593	0,387	0,224
SODIO TIOSULFATO 1%	0,354	2205,080	5,37	1000	354	1,903	0,386	0,225

Tabla 4-12 Resultados parámetros térmicos

De estos resultados se extrae que las probetas con PCM tienen una mayor capacidad de absorción de energía térmica. La probeta con sodio tiosulfato es la que mayor capacidad tiene de absorción, teniendo el acetato de sodio la misma capacidad que la del hormigón sin PCM. Además, dichas probetas tienen un coeficiente de conductividad similar entre ellas y mayor que la probeta sin PCM, lo que supone una menor resistencia térmica.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Revisión de los objetivos

Llegado a este punto del trabajo, se puede afirmar que los objetivos propuestos al comienzo del mismo se han cumplido con satisfacción. Aunque existe mucha información al respecto, el empleo de los PCM se encuentra actualmente bastante limitado a ciertos tipos de aplicaciones. Sin embargo, en un futuro no tan lejano se podrán encontrar estos materiales en prácticamente todos los objetos de nuestro entorno como ropa, envases de alimentación, etc. De todas estas aplicaciones, la principal línea de investigación de estos materiales se centra en la edificación, debido a la necesidad cada vez más importante de aumentar la eficiencia energética. Estos materiales deben concebirse como complemento a los sistemas de climatización.

A pesar de que el tiempo y los medios disponibles para la realización de este TFG han sido limitados, se ha podido contribuir al estudio y análisis sobre la incorporación de PCM en un elemento constructivo como es el hormigón. Para ello, se han empleado tres sales hidratadas diferentes que han arrojado diversos e interesantes resultados sobre su combinación junto a matriz de hormigón.

5.2 Conclusiones

Durante los pasos previos a la realización de los ensayos, quedó patente la necesidad de cumplir la normativa que regula el proceso de elaboración y ensayo de las probetas. Debido a limitaciones de los medios disponibles hubo que realizar dichas probetas y ensayos adaptándolas a los equipos puestos a disposición para el trabajo. Para ello, factores como la esbeltez de las probetas o su proceso de elaboración son importantes en los resultados. Como se ha podido observar a lo largo de este trabajo, las probetas pequeñas no son las más apropiadas para el estudio de la resistencia a compresión debido a la dificultad de realizar ensayos con ellas y a los bajos valores obtenidos. También ha quedado patente la necesidad de emplear moldes destinados para tal efecto que permitan un fácil hormigonado y que reduzcan la aparición de cavidades y porosidad. El refrentado de las superficies de las probetas es prácticamente obligatorio para realizar una mejor distribución de las cargas durante los ensayos a compresión y estos no se vean alterados. Pero se han podido realizar experimentos que permiten observar el comportamiento de distintos materiales.

Una de las conclusiones más importantes a las que se ha llegado durante este trabajo ha sido la de la importancia de una buena elección de la dosificación. Ésta se ha podido observar durante los pasos previos llevados a cabo con los cuatro tipos de dosificaciones diferentes propuestas, y que pusieron de manifiesto que pequeñas variaciones en las cantidades de los materiales empleados conllevan importantes variaciones de la resistencia, consistencia, durabilidad, etc. del hormigón endurecido.

En relación a esto, un factor sumamente importante es la relación agua/cemento. Un mayor de cantidad de agua en la mezcla proporciona una mejor trabajabilidad a la hora de hormigonar o de rellenar un molde pero influye directamente en las propiedades finales del hormigón. El exceso de agua favorece la formación de poros, la cual conlleva un aumento de la permeabilidad y menor resistencia. Sin embargo, se puede mantener una buena trabajabilidad mediante la adición de plastificantes a la mezcla, como se ha realizado en este trabajo.

Entre los problemas encontrados destacan el mal estado del cemento empleado al principio, el cual no reaccionaba bien y provocaba que las probetas no resistiesen, y la compactación, la cual se hacía complicada de realizar en probetas tan pequeñas con la consiguiente aparición de cavidades posteriormente.

Otro factor importante a tener en cuenta es el proceso de curado. Como se pueden observar en las curvas de resistencias elaboradas, el hormigón adquiere gran parte de su resistencia durante los primeros días por lo que se hace necesario un estricto control de la misma procurando que las probetas siempre estén en las condiciones óptimas de hidratación para que el cemento pueda terminar de reaccionar en su interior una vez ha fraguado.

En cuanto a los PCM empleados en este trabajo, como sales hidratadas destacan generalmente por su bajo coste, densidad de almacenamiento térmico elevada y una mejor conductividad térmica que el resto. Sin embargo, provocan corrosión en metales, segregación de fases y subenfriamiento. Todos estos inconvenientes pueden ser solucionados en parte mediante técnicas de encapsulamiento y agentes de nucleación, los cuales encarecen el coste de los mismos.

Los ensayos han arrojado una serie de conclusiones que se muestran a continuación:

- Los ensayos de caracterización de los PCM empleados han mostrado que aunque los procesos de fusión se desarrollan en un rango de temperaturas, como puede observarse en los ensayos mediante DSC, estos tienen un punto bien definido de fusión como se observan en las curvas de calentamiento de las sucesivas graficas del apartado 4.1.3. También se ha podido contemplar el proceso de subenfriamiento durante la fase de enfriamiento, provocando que la solidificación se lleve a cabo en un punto diferente al establecido. Las temperaturas de fusión obtenidas por diferentes métodos obligan a descartar el acetato de sodio y sodio tiosulfato para su empleo en edificación, puesto que las temperaturas que son necesarias para la fusión de los mismos son prácticamente imposibles en condiciones normales. El único que presenta unas temperaturas adecuadas en la edificación es el zinc nitrato, las cuales se encuentran entorno a los 35°C.
- Los ensayos a compresión han mostrado importantes conclusiones al respecto. Por un lado, se ha comprobado que generalmente a mayor porcentaje de PCM menor resistencia adquieren las probetas, aunque para valores de un 1 y 2% las diferencias no son demasiadas importantes. Por otro lado, las probetas con PCM que más han resistido han sido las que incorporaban sodio tiosulfato, las cuales no difieren demasiado con las resistencias de las probetas sin PCM. En el lado opuesto, las probetas con zinc nitrato han sido las que menos han resistido con diferencia y, a simple vista, se observa de los fragmentos que los compuestos no han reaccionado correctamente en el interior pues presentan un aspecto frágil y quebradizo. A la vista de esto, se intuye que el zinc nitrato puede reaccionar químicamente con el cemento provocando este debilitamiento. Los porcentajes de resistencia alcanzados con respecto a la de los 28 días son similares entre las probetas con y sin PCM.
- Los resultados de los ensayos de dureza corroboran los obtenidos mediante los de compresión, ya que la probeta que más resistencia presenta se corresponde es la del sodio tiosulfato con un 1%. Estos resultados son mayores que los obtenidos mediante compresión pero únicamente miden la resistencia superficial. Además, se han visto más afectados por las dimensiones de las probetas y manipulación de los equipos por personal ajeno.

- Con respecto a la variación de la humedad de las probetas, se ha comprobado que las que más variaciones sufren son las probetas con zinc nitrato. Esto puede estar relacionado con la baja resistencia que soportan. En general, las probetas con mayores humedades han presentado una menor resistencia independientemente de la cantidad y el tipo de PCM.
- Del análisis de los fragmentos a través del microscopio es difícil extraer conclusiones más allá de pequeñas grietas y porosidad. Esto se debe principalmente a que el microscopio utilizado no es el adecuado para este tipo de materiales.
- Los ensayos térmicos muestran que tanto la probeta con acetato de sodio al 1% como la de sodio tiosulfato al 1% presentan una mayor inercia térmica y reducen la oscilación térmica entre los extremos de las probetas en comparación con la probeta sin PCM. No obstante, el sodio tiosulfato es el que presenta una mayor capacidad de absorción de calor, ya que las temperaturas entre los dos sensores instalados en la probeta son menores que las del resto de probetas.

Como resumen de todo lo anterior, se puede afirmar que el zinc nitrato es el que tiene una temperatura de fusión óptima para su empleo en construcción pero los resultados en cuanto a resistencias no son satisfactorios. Los otros dos PCM presentan una resistencia similar, pero el acetato de sodio es descartado por tener una temperatura de fusión de 10°C mayor que la del sodio tiosulfato y una menor capacidad de absorción de calor.

5.3 Líneas futuras

Ante los problemas planteados anteriormente, surgen nuevas líneas de investigación a partir de los resultados obtenidos en este trabajo. Las sales utilizadas como PCM presentan problemas derivados de su interacción con el material de la matriz. A la vista de los buenos resultados térmicos que ha mostrado el zinc nitrato, resultaría interesante continuar su investigación aplicando técnicas de encapsulamiento para evitar dicha interacción. Otra línea de investigación sería disolver dicha sal en una sustancia líquida que mediante recirculación sea capaz de aumentar la inercia térmica de la construcción. Aunque no se ha planteado en el trabajo, sería bueno estudiar la posibilidad de combinación de los PCM empleados, para que entre ellos sean capaces de suplirse las deficiencias. La investigación llevada a cabo podría ser continuada mediante el empleo de software que permita la simulación, pudiendo así completar los resultados obtenidos.

Aunque este trabajo solo se ha centrado en elementos constructivos, resulta interesante indagar sobre el empleo de estos u otros materiales de cambio de fase en otras aplicaciones como puede ser en el sector textil. Igualmente, la investigación sobre la degradación y la vida útil de estos PCM resultan importantes para llevar a cabo una posterior aplicación. El estudio sobre los ciclos de vida de forma experimental es un aspecto poco tratado y que ofrece infinidad de posibilidades. No menos importante, resulta un análisis sobre la viabilidad económica.

5.3.1 Aplicación en el ámbito de la Armada

Actualmente las Fuerzas Armadas en general y la Armada en particular, se encuentran sumidas en un proceso de certificación ambiental y energética de todas sus instalaciones. Es en este aspecto donde la aplicación de los PCM puede ser implantada. Su uso puede ser de lo más variado, pues pueden ser aplicados desde cuarteles y oficinas hasta almacenes, pañoles y polvorines. La aplicación en estas últimas instalaciones resulta de lo más interesante, pues debido a las características especiales que deben tener ante la necesidad de conservar munición y explosivos, se hace necesario un estricto control de las temperaturas y sus variaciones. Sin embargo, puede resultar difícil de llevar a cabo puesto que solo se aplicarían en los de nueva construcción.

En relación a lo anterior, otra posible aplicación más factible de llevar a cabo sería la de un recubrimiento o pintura que incorporará un material de cambio de fase en las cajas de urgencia cercanas

a los puestos de ametralladoras. Estas cajas especiales están destinadas a contener munición y su localización suele ser en exteriores de los barcos, por lo que se encuentran bajos los efectos de las inclemencias climáticas. Al igual que en pañoles y polvorines, requieren de un estricto control de la temperatura por la peligrosidad del material que contienen. Otra vía de estudio sería su empleo en módulos prefabricados. Dichos módulos estarían destinados a servir de instalaciones en zonas de operaciones sometidas a climas extremos como pueden ser Irak o Afganistán, donde las temperaturas y sus variaciones son altas.

Fuera del ámbito de la construcción, la aplicación en tejidos inteligentes sería de lo más atrayente. Desde ropa pasando por botas hasta cascos podrían servir como principales elementos que incorporaran PCM, mejorando el confort de las personas.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. A. O. Ramírez, «Integración de materiales de cambio de fase en placas de yeso reforzadas con fibras de polipropileno,» Madrid, 2009.
- [2] P. D. Bielsa, «Almacenamiento térmico de energía mediante cambio de fase. Diseño y modelización de equipos de almacenamiento para intercambio de calor con aire.,» Univesidad de Zaragoza, Zaragoza, 2011.
- [3] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, «Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía,» Secretaría de Estado de Energía, [En línea]. Available: <http://www.idae.es/>. [Último acceso: 11 Febrero 2017].
- [4] OFICEMEN, «OFICEMEN,» Agrupación de fabricantes de cemento en España, [En línea]. Available: <https://www.oficemen.com/>. [Último acceso: 11 2 2017].
- [5] D. A. Arranz, «Yeso aditivo con materiales e cambio de fase para su aplicación en rehabilitaciones energéticas en interiores de edificios protegidos».
- [6] M. Á. Á. Feijoo, «Estudio experimental del comportamiento térmico de distintos tipos de paneles de hormigón empleados en la construcción,» Vigo, 2015.
- [7] M. M. M.R. Anisur, «Curbing global warming with phase change materials for energy store,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, p. 24, 2012.
- [8] M. B. Garcés, «Evaluación de impacto ambiental mediante análisis de ciclo de vida (ACV) de la incorporación de materiales de cambio de fase (PCM) en edificación,» Zaragoza, 2015.
- [9] A. C. Parish, «Estudio térmico de las fachadas ventiladas con aletas de PCM».
- [10] I. Dinçer y M. A. Rosen, *Thermal Energy Storage*, Ontario: Wiley, 2011.
- [11] S. O. C. Maya, «Incorporación de PCM en elementos constructivos para la mejora energética,» 2010.
- [12] A. Sharma, «Review on thermal energy storage with phase change materials and applications,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 318-345, 2009.

- [13] M. M. Farid, «A review on phase change energy storage: materials and applications.,» *Energy Conversion and Management*, pp. 1597-1615, 2004.
- [14] D. Zhou, Y. Z. C. y T. Y., «Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications,» *Applied Energy*, vol. 92, pp. 59-605, 2012.
- [15] IECA, «Instituto español del cemento y sus aplicaciones,» [En línea]. Available: https://www.ieca.es/reportaje.asp?id_rep=692. [Último acceso: 30 Enero 2016].
- [16] A. Gálvez, *Materiales para almacenamiento energético y estructuras compuestas en cerramientos eco-eficientes*, Acciona Infraestructuras, 2014.
- [17] E. Hernández Montes y L. M. Gil Martín, *Hormigón armada y pretensado*, Granada, 2007.
- [18] J. M. Olarte, «Investigación sobre la aplicación del almacenamiento de energía térmica mediante materiales de cambio de fase en elementos de construcción termoactivos.,» Zaragoza, 2016.
- [19] L. Cabeza, M. Medrano, C. Castellón, A. Castell, C. Solé, J. Roca y M. Nogués, «Thermal energy storage with phase change materials in building envelopes,» Universitat de Lleida, Lleida, 2005.
- [20] A. G. E. I. M. H. J. H. B. a. M. F. M. Hunger, «The behavior of self-compacting concrete containing micro-encapsulated Phase Change Materials,» *Cement and Concrete Composites*, vol. 31, nº 11, pp. 731-743, 2009.
- [21] DCL Metrología, «DCL Metrología,» [En línea]. Available: <http://www.instrumentacion-metrologia.es/Cronometro-Digital-941-Ventix>. [Último acceso: 12 FEBRERO 2017].
- [22] F. J. M. Yedra, «Obtención de diésel a partir de aceite usado de buques,» Marín, 2015.
- [23] HEALTH EQUIPMENT SUPPLY, «HES,» [En línea]. Available: <https://hesltda.cl/producto/agitador-magnetico-con-calefaccion-msh2/>. [Último acceso: 12 FEBRERO 2017].
- [24] HANNA Instruments, «HANNA Instruments,» [En línea]. Available: <http://www.hannainst.es/catalogo-por-aplicaciones/laboratorio/laboratorio/termometros/termometro-compacto-con-1m-de-cable-hi-98509-checktemp>. [Último acceso: 12 FEBRERO 2017].
- [25] Gunt Hamburg, «GUNT,» [En línea]. Available: http://www.gunt.de/index.php?option=com_gunt&task=gunt.list.category&product_id=1540&lang=es. [Último acceso: 12 FEBRERO 2017].
- [26] PCE, «PCE,» [En línea]. Available: <http://www.pce-iberica.es/medidor-detalles-tecnicos/instrumento-de-dureza/durometro-pce-ht-225.htm>. [Último acceso: 12 FEBRERO 2017].
- [27] DANOSA, «DANOSA,» [En línea]. Available: <http://www.danosa.fr/danosa/CMSServlet?node=T32&lng=1&site=1>. [Último acceso: 18 FEBRERO 2017].
- [28] Maxim Integrated, «Maxim Integrated,» [En línea]. Available: <https://www.maximintegrated.com/en/products/digital/ibutton/DS9490B.html>. [Último acceso: 23 FEBRERO 2017].

- [29] iButton, «iButton,» [En línea]. Available: <http://ibutton.cl/lector-ibutton-usb-ds9490b-1-wire/>. [Último acceso: 23 Febrero 2017].
- [30] KRÜSS, «KRÜSS,» [En línea]. Available: <http://www.kruess.com/laboratory/products/microscopes/microscopes-biology/>. [Último acceso: 23 FEBRERO 2017].
- [31] PanReac AppliChem, «PanReac AppliChem,» [En línea]. Available: https://www.applichem.com/fileadmin/datenblaetter/A3628_es_ES.pdf. [Último acceso: 13 FEBRERO 2017].
- [32] QUIMIPUR, «QUIMIPUR,» [En línea]. Available: <http://quimipur.com/productos/productos-quimicos/zinc-nitrato-6-hidrato>. [Último acceso: 13 2 2017].
- [33] MERK MILLIPORE, «MERK MILLIPORE,» [En línea]. Available: https://www.merckmillipore.com/INTERSHOP/web/WFS/Merck-ES-Site/es_ES/-/EUR/ProcessMSDS-Start?PlainSKU=MDA_CHEM-106516&Origin=PDP. [Último acceso: 13 FEBRERO 2017].
- [34] S. G. Casado, «Estudio del comportamiento del cemento al combinarlo con diferentes aditivos para la fabricación del hormigón,» Zaragoza, 2011.
- [35] FUCHS, «FUCHS,» [En línea]. Available: <http://www.fuchs.es/desencofrantes.html#mineral>. [Último acceso: 18 2 2017].
- [36] Ministerio de Fomento, Instrucción de Hormigón Permanente, 2008.
- [37] C. Videla, «Dosificación de hormigones,» [En línea]. Available: <http://es.slideshare.net/wilmanes/dosificaciones-dehormigon>. [Último acceso: 20 Febrero 2017].
- [38] AENOR, Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 2: ensayos no destructivos. Determinación del índice de rebote., 2013.
- [39] CUD - ENM, *Práctica de fabricación y ensayos de hormigón (Ingeniería de los materiales)*, Marín, 2014.
- [40] AENOR, *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas.*, 2009.
- [41] s. Suriñach, M. D. Baro, S. Bordas, N. Clavaguera y M. T. Clavaguera-Mora, «La calorimetría diferencial de barrido y su aplicación a la Ciencia de Materiales,» *Boletín Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, nº 31, pp. 11-17, 1992.
- [42] Universidad Complutense de Madrid, «UCM,» [En línea]. Available: <https://cv3.sim.ucm.es/wiki/site/curriculo-3313-1/Subenfriamiento@7.html>. [Último acceso: 27 FEBRERO 2017].
- [43] Real Academia de Ingeniería, [En línea]. Available: <http://www.raing.es/es>. [Último acceso: 27 FEBRERO 2017].
- [44] Código Técnico de Edificación, «CTE WEB,» [En línea]. Available: <http://cte-web.iccl.es/materiales.php?a=7>. [Último acceso: 4 Marzo 2017].

- [45] «Web de La Moncloa,» [En línea]. Available: <http://www.lamoncloa.gob.es>. [Último acceso: 13 enero 2015].
- [46] J. Rodríguez y V. Fernández, *Cómo redactar el estado del arte de un trabajo*, Editorial Genios, 2010.
- [47] P. Martínez y A. García, *Cómo escribir una buena memoria de TFG*, Publicaciones del 2000, 2013.
- [48] A. Pérez, *Cómo escribir una bibliografía*, Nuevas publicaciones.
- [49] A. Abhat, «Low temperature latent heat thermal energy storage: Heat storage materials.,» *Solar Energy*, pp. 313-332, 1983.
- [50] A. Solé, Hannah Neumann y Sophia Niedermaier, «Stability of sugar alcohols as PCM for thermal energy storage,» *Solar Energy Materials & Solar Cells*, n° 126, pp. 125-134, 2014.
- [51] J. R. S. Martín, «Los tejidos inteligentes y el desarrollo tecnológico de la industria textil.,» *Técnica Industrial*, n° 268, 2007.
- [52] N. M. L. Soares, «Thermal energy storage with phase change materials for the improvement of the energy performance of buildings,» Coimbra, 2015.
- [53] University of California, «UCLA,» [En línea]. Available: <https://www.seas.ucla.edu/~pilon/materialsProcessing0.html>. [Último acceso: 5 Febrero 2017].
- [54] Secretaría de Estado de Energía, *La energía en España 2015*, Madrid, 2015.
- [55] EMYER, «EMYER,» [En línea]. Available: http://www.emyer2002.com/index.php?arxiu=fitxa_document&id=9021. [Último acceso: 11 FEBRERO 2017].
- [56] S. G. Casado, 2011.
- [57] Tu aire acondicionado, «Tu aire acondicionado,» [En línea]. Available: <http://tuaireacondicionado.net/calor-sensible-y-calor-latente/>. [Último acceso: 17 Enero 2017].
- [58] Universidad de Oviedo, [En línea]. Available: <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Temas3y4.CementoHormigon.ProblemasHormigon.Enunciados.pdf>. [Último acceso: 25 FEBRERO 2017].
- [59] «Universidad de Cordoba,» [En línea]. Available: <http://www.uco.es/~iq2sagrl/TranspATG.pdf>. [Último acceso: 26 FEBRERO 2017].

ANEXO I: TABLAS AMPLIATORIAS

	Orgánicos		Inorgánicos		Eutécticos
	Parafinas	No parafinas (ácidos grasos)	Sales hidratadas	Metales	
Fórmula	C_nH_{2n+2} (n=12-38)	$CH_3(CH_2)_nCOOH$	$AB \cdot nH_2O$	–	–
Punto de fusión	-12–71 °C	7.8–187 °C	11–120 °C	30–96 °C	4–93 °C
Calor latente de fusión	190–260 J/g	130–250 J/g	100–200 J/g	25–90 J/g	100–230 J/g
Características	Punto de fusión y calor latente aumenta con la longitud de la cadena El más utilizado como PCM comercial	Fusión en un amplio rango de temperaturas y alto calor latente	El más antiguo y más estudiado. Aleaciones de sales inorgánicas y agua	No está considerado seriamente debido a su densidad	Composición de dos o más componentes
Coste	Relativamente bajo coste (comparado con otros)	Dos o tres veces más costoso que las parafinas	Bajo coste	Costoso	Costoso
Ventajas	Fusión congruente sin tendencia a segregar fases Bajo o ningún subenfriamiento Estabilidad química y térmica		Alta entalpía de cambio de fase Alta conductividad térmica		Alto calor de fusión por unidad de volumen. Alta conductividad Fundee y solidifica sin segregación de fases.
	Químicamente estable No corrosivos Compatible con todos los contenedores metálicos Disponibilidad en una amplia gama de temperaturas	Transformación de fase marcada Alto calor de fusión comparado con la parafina	Fácil disponibilidad Marcado punto de fusión Menor variación de volumen que otros Alta densidad Compatible con los plásticos	☑ Elevado calor de fusión por unidad de volumen.	
Desventajas	Baja entalpía de cambio de fase Baja conductividad térmica Inflamable. No debe exponerse a temperaturas excesivamente altas, llamas o agentes oxidantes		Subenfriamiento Corrosión Separación de fases Segregación de fases		

	<p>No tiene bien definido el punto de fusión. Elevada variación de volumen No compatibles con recipientes de plástico</p>	<p>Levemente corrosivo Variado nivel de toxicidad Inestable a altas temperaturas</p>	<p>Corrosión según el contenedor metálico Debido a la elevada densidad, las sales se depositan en la parte inferior y reducen el volumen activo Ligeramente tóxicos</p>	<p>Bajo calor de fusión por unidad de peso Bajo calor específico Elevado peso</p>	<p>Bajo calor de fusión por unidad de peso</p>
<p>Ejemplos (PF en °C, Calor latente en J/g)</p>	<p>n-tridecano (4.5, 231), parafina comercial (26, 110), n-trioctano (65,252) n-heptadecano (21, 171)</p>	<p>Ácido acético (16.7, 187), ácido esteárico (61, 200), ácido láurico (42, 178), otras no parafinas como ésteres, glicol, p.e., glicerina (18, 198.7), cera de abeja (61.8, 177)</p>	<p>CaCl₂·6H₂O (29, 180), Na₂SO₄·10H₂O (32, 251), NaCl·Na₂SO₄·6H₂O (18, 286), MgSO₄·7H₂O (48.4, 200)</p>	<p>Galio (30, 80.3), Galio-Galio (29.8,-),</p>	<p>Na₂SO₄+NaCl+KCl+H₂O (4, 234), NH₂CONH₂+NH₄NO₃ (46, 95) Ácido Cáprico-A. Mirístico (21.4, 152) Bi-Pb-In eutéctico (70, 29)</p>

Tabla A3-1 Comparativa de propiedades de los diferentes grupos de PCM [8]

Mezcla (ácidos grasos)	T _m °C	T _i °C	T _m °C	ΔH _m kJ/kg
Cáprico	31,5	30,1	1,4	158
Laurico	42,0-44,0	41,3	0,7 -2,7	179
Pentadecano	52	-	-	159
Mirístico	54,0	52,1	1,9	190
Palmítico	63,0	54,1	8,9	183
Estearico	70,0	64,5	5,5	196
Eritrol	116-118	-	-	126

Tabla A3-2 Características térmicas de algunos ácidos grasos [1]

PCM	Nº ciclos	Observaciones	T _f (°C)	ΔH _f (J/g)
C_{22.2}H_{44.1} Calidad técnica	900	ND	47.1	166
C_{23.2}H_{48.4} Calidad técnica	900	ND	57.1	220
C_{24.7}H_{51.3} Calidad técnica	900	ND	62.6	
Cera de parafina de calidad comercial	300	ND	53	184
Cera de parafina de calidad comercial	1500	ND	53	184
Cera de Parafina de calidad comercial	600	Se observaron cambios en el ΔH _f significativos	58-60	129.8
Cera de parafina de calidad comercial	600	Se observaron cambios en el ΔH _f significativos	60-62	129.7
Cera de parafina de calidad comercial	1500	ND	54	184.5
Parafina (70%peso) + polipropileno (30%) (PP) material de apoyo	3000	ND	44.77	136.2
n-Heptadecano (38% peso) con polimetacrilato de metilo	5000	ND	18.4	84.7
n -Heptadecano (63.3 % peso). Micro/nano encapsulado con poliestireno (PS)	5000	ND El heptadecano sin encapsular se degrada completamente con el aumento de temperatura pero soporta bien las altas temperaturas encapsulado	21.48	136.89
Parafina comercial Micronal	10000	ND	26	110

ND: no degradación

Tabla A3-3 Propiedades térmicas de las parafinas [8]

PCM	Nº ciclos	Observaciones	T _f (°C)	ΔH _f (J/g)
Ácido palmítico	120	Algo de sobreenfriamiento aunque se consideró insignificante para el uso de almacenamiento de calor	61.2	196.1
Ácido palmítico	450	Disminuye un 10% su capacidad de almacenamiento (ΔH _f)	57.8	201.2
Ácido palmítico	1200	ND	61.3	197.9
Ácido palmítico	910	ND compatibles Acero inoxidable (SS 304L) con capa superficial de (Cr ₂ O ₃) y el aluminio (Al) con capa superficial de (Al ₂ O ₃)	59.9	197.9
Ácido palmítico (80% peso de PA) y grafito expandido (20% en peso de EG)	3000	ND	60.9	148.3
Ácido láurico CH ₃ (CH ₂) ₁₀ COOH	120	Algo de sobreenfriamiento aunque se consideró insignificante para el uso de almacenamiento de calor	43.5	169.3
Ácido láurico CH ₃ (CH ₂) ₁₀ COOH	1200	ND	42.5	176.6
Ácido láurico CH ₃ (CH ₂) ₁₀ COOH	910	ND aunque peor estabilidad que palmítico y Mirístico. Compatibles Acero inoxidable (SS 304L) con capa superficial de (Cr ₂ O ₃) y el aluminio (Al) con capa superficial de (Al ₂ O ₃)	42.6	211.6
Ácido láurico CH ₃ (CH ₂) ₁₀ COOH	500	ND independientemente de la pureza del material (incluso a diferente grado de pureza)	43	184
Ácido mirístico C ₁₄ H ₂₈ O ₂	450	Disminuye un 10% su capacidad de almacenamiento (ΔH _f) Este autor considera 450 ciclos aprox 1año	50.4	189.4
Ácido mirístico C ₁₄ H ₂₈ O ₂	1200	ND	53	181
Ácido mirístico C ₁₄ H ₂₈ O ₂	910	ND compatibles Acero inoxidable (SS 304L) con capa superficial de (Cr ₂ O ₃) y el aluminio (Al) con capa superficial de (Al ₂ O ₃)	53.8	192
Ácido esteárico CH ₃ (CH ₂) ₁₆ COOH	450	Disminuye un 10% su capacidad de almacenamiento (ΔH _f)	65.2	209.9
Ácido esteárico CH ₃ (CH ₂) ₁₆ COOH	300	ND	62.6	154.6
Ácido esteárico	1500	ND	63	155

CH₃(CH₂)₁₆COOH				
Ácido esteárico CH₃(CH₂)₁₆COOH	1200	ND	54.7	159.3
Ácido esteárico CH₃(CH₂)₁₆COOH	700	ND	53.8	174.6
Acetamida	300	ND pero absorbe humedad del entorno	82.2	262.78
Acetamida	1500	ND pero absorbe humedad del entorno	82.2	263
Urea	50	Degradación en las propiedades térmicas	133	250
Metil estearato	50	ND	37.8	270
Metil palmitato	50	ND	29	215
Eritritol (C₄H₁₀O₄)	1000	ND	118	339
Ácido cáprico (CA 55% peso CH₃(CH₂)₈COOH) y perlita expandida (EP 45% peso)	5000	ND (Añadiendo grafito expandido además mejoran la conductividad).	31.8	98.12
Acetanilida C₈H₉NO	500	ND compatible con recipiente de aluminio pero muestra una pequeña corrosión con el acero inoxidable	116	169.4
Mio inositol C₆H₁₂O₆	50	Cambios polimórficos del material pero no afectan a la estabilidad térmica. Degradación por la presencia de O ₂ . Necesitaría encapsulamiento	223	266.1
Galacticol C₆H₁₄O₆	18	Disminuyen los valores de entalpía y temperatura en el cambio de fase. Degradación por la presencia de O ₂ . Necesitaría encapsulamiento	187.3	357.7
d-manitol C₆H₁₄O₆	50	Disminuye la ΔH _f 50%. Histéresis. Degradación por la presencia de O ₂ . Necesitaría encapsulamiento	166	279

ND: no degradación

Tabla A3-4 Propiedades térmicas de los compuestos orgánicos no parafínicos [8]

PCM	Nº ciclos	Observaciones	T _f (°C)	ΔH _f (J/g)
Sal de Glauber o Sulfato de sodio Na ₂ SO ₄ Nucleante Borax (Na ₂ B ₄ O ₇ ·10H ₂ O, tetraborato de sodio) y espesante arcilla (Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂ ·H ₂ O)	320	ND	32.4	238
Sal de Glauber o Sulfato de sodio Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O	100	Los picos endotérmicos y exotérmicos relacionados con la fusión y solidificación desaparecen / no mostraron buena estabilidad	32	-
Na ₂ SO ₄ ·nH ₂ O (Tubos PCM)	1000	Ningún deterioro físico del contenedor (tubos de acero laminado) pero no se estudió las propiedades termofísicas del PCM	-	-
Na ₂ SO ₄ ·1/2NaCl·10H ₂ O	300	Los picos endotérmicos y exotérmicos relacionados con la fusión y solidificación desaparecen / no mostraron buena estabilidad	20	-
Acetato de sodio trihidrato (CH ₃ CO ₂ Na·3H ₂ O) espesado con alcohol polivinílico y como nucleante pirofosfato de sodio decahidrato (Na ₂ P ₄ O ₇ ·10H ₂ O)	500	ND	58	230
Acetato de sodio trihidrato (CH ₃ CO ₂ Na·3H ₂ O) como nucleante fosfato disódico (Na ₂ HPO ₄)	100	Separación de fases tras 100 ciclos. El acetato puro no tolera repetidos cambios de fase sin añadir espesante. La muestra tomada era mayor que en el experimento realizado por [57]	58	252
Cloruro de calcio hexahidrato (CaCl ₂ ·6.11H ₂ O) como nucleante NaCl(1%peso)	1000	ND (Al disolver NaCl en CaCl ₂ ·6H ₂ O evitaron el problema de la separación de fases)	29.8	190.8
Cloruro de calcio hexahidrato (CaCl ₂ ·6H ₂ O) con nucleante cloruro de estroncio hexahidrato y espesante gel de sílice	1000	ND	28	86
Cloruro de calcio hexahidrato (CaCl ₂ ·6H ₂ O)	5650	ND Estudiaron la corrosión según contenedores y el mejor resultado el acero inoxidable	27	-
Cloruro de calcio hexahidrato (CaCl ₂ ·6H ₂ O)	1000	ND	23.26	125.4

Triclorofluorometano heptadecahidrato (CCl₃F·17H₂O) (R11) nucleante fluoruro de butilamonio tetrahidrato (C₄H₉)₄NF·34.4H₂O) y espesante poliacrilamida (C₃H₅NO) (PAA)	100	ND	8.5	210
Hidróxido de sodio hidrato NaOH·3.5H₂O	10	Los picos endotérmicos y exotérmicos relacionados con la fusión y solidificación desaparecen / no mostraron buena estabilidad	15	-
Hidróxido de sodio NaOH	1	No se pudo volver a fundir una segunda vez. La muestra ganó humedad	66	227
Hidróxido de Bario octahidrato Ba(OH)₂·8H₂O	1	No apto para almacenamiento de calor. No llegó a fundirse	78	265
Tetraborato de sodio decahidrato Na₂B₄O₇·10H₂O	1	No apto para almacenamiento de calor. Fusión a temperatura variable +4°C de lo esperado	72	138
Nitrato férrico hexahidrato Fe(NO₃)₃·6H₂O	1	No apto para almacenamiento de calor. No solidificó según lo esperado	52	99
Cloruro de magnesio hexahidrato MgCl₂·6H₂O	500	No estable sin contenedor por segregación de fases, además no compatible ni con aluminio ni con acero inoxidable	111.5	155.1
Cloruro de magnesio hexahidrato MgCl₂·6H₂O	1000	Estable con agua adicional y recipiente sellado evita el sobreenfriamiento y la segregación de fases	110.8	138

ND: no degradación

Tabla A3-5 Propiedades térmicas de las sales inorgánicas hidratadas [8]

PCM	Nº ciclos	Observaciones	T _f (°C)
LA/PA Ácido láurico – ácido palmítico (LA 69%–PA 31%),	1460	ND	
MA/SA Ácido mirístico – ácido esteárico (MA 64%–SA 36%)	1460	ND	
CA/LA Ácido cáprico – Ácido láurico (CA 65.12% peso–LA 32.88% peso)	360	ND	
CA/LA Ácido cáprico – Ácido láurico (CA 65.12% peso–LA 32.88% peso)	360	ND	
CA/MA Ácido cáprico – Ácido mirístico (CA 73.5% peso–LA 26.5% peso) en perlita expandida porosa	5000	ND	
CA/MA Ácido cáprico – Ácido mirístico (CA 73.5% peso–LA 26.5% peso) en perlita expandida porosa con 10% peso de grafito expandido	5000	ND Mejoró las propiedades térmicas un 58% con el grafito expandido	
CA/SA Ácido cáprico – ácido esteárico (CA 83%–SA 17%)	5000	ND	
Glicerol trimiristato	1000	ND	31.96
Glicerol tripalmitato	1000	ND	58.5
Glicerol triestearato	1000	ND	63.45
Ácido cáprico- 1-dodecanol	120	ND	
NaCH ₃ COO·3H ₂ O (90%)+NaBr·2H ₂ O (10%) y NaCH ₃ COO·3H ₂ O (85 %)+NaHCOO·3H ₂ O (15%).	1000	ND	
CaCl ₂ ·6H ₂ O (80 mol%)+CaBr ₂ ·6H ₂ O (20 mol%), Nucleante fluoruro de bario	1000	ND	
CaCl ₂ ·6H ₂ O (93%)+Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O (5%)+Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O (2%) Nucleante fluoruro de bario	1000	ND	
CaCl ₂ ·6H ₂ O (96%)+NH ₄ NO ₃ (2%)+NH ₄ Br (2%), Nucleante fluoruro de bario	1000	ND	
CaCl ₂ ·6H ₂ O (96%)+KNO ₃ (2%)+KBr (2%). Nucleante	1000	ND	

fluoruro de bario			
Nitrato de magnesio hexahidrato ($Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ (93%)) y cloruro de magnesio hexahidrato ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$ (7%))	1000	ND	
Polimetilmetacrilato (PMMA)/ n - nonadecano (C19) (1:2)	5000	ND	31.23
micro/nanoencapsulado (M/NEPCM)			
RT21 comercial	200 días	Pérdida de masa sometido a elevadas temperaturas, necesario encapsulamiento	
Mezcla de parafina ligera, propil éster (ácido esteárico y palmitato (80:20))	200 días	Estable térmicamente no pérdida de masa	18-25
Parafina + oxido de grafeno	2500	El grafeno disminuye el sobreenfriamiento de la parafina	
Ácido esteárico recubierto con policarbonato	1000	Buena estabilidad térmica	
n-eicosano recubierto con polimetilmetacrilato (PMMA)	5000	No hay grandes variaciones de energía térmica	
n-octadecano recubierto con nbutil metacrilato	1000	ND	
MA/PA Ácido mirístico / ácido palmítico (MA/PA) (70/30%)	1500	ND	
MA/PA/SS Ácido mirístico / ácido palmítico /estearato de sodio (MA/PA/SS) (70/30/5%)	1500	Mejor estabilidad térmica que MA/PA. También mejor estabilidad de la estructura térmica y menor variación de volumen que MA/PA	

ND: no degradación

Tabla A3-6 Propiedades térmicas de los PCM eutécticos [8]

ANEXO II: FICHA TÉCNICA DEL APARATO DE ENSAYOS UNIVERSAL

Página 1/3
11/2002

gunt
-WÄRMELÖSUNG-

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:

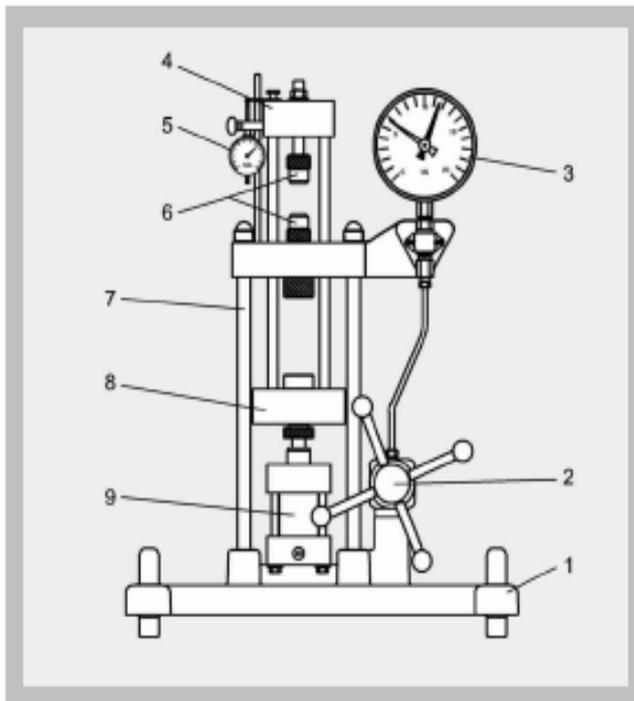
- Ensayo de flexión
- Ensayo de embutición
- Ensayo de cizallamiento
- Comprobación de resorte de plato y helicoidales

- 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 pies de goma, 2 volante manual, 3 indicador de fuerza, 4 travesía superior, 5 ple de rey para carrera de deformación, 6 cabezal de fijación, 7 columnas de bastidor, 8 travesía 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 LxAnxAI 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 traviesas con columnas de acero pulido, posible generación de la fuerza de compresión y de tracción
- [12] Base de la máquina de fundición, con pies de goma
- [13] LxAnxAI 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: LxAnxAI 30x30x10mm
 Diámetro de la bola de comprobación: Ø10mm

Dimensiones y pesos

L x An x AI: 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

Ejemplos de resultados de la medición

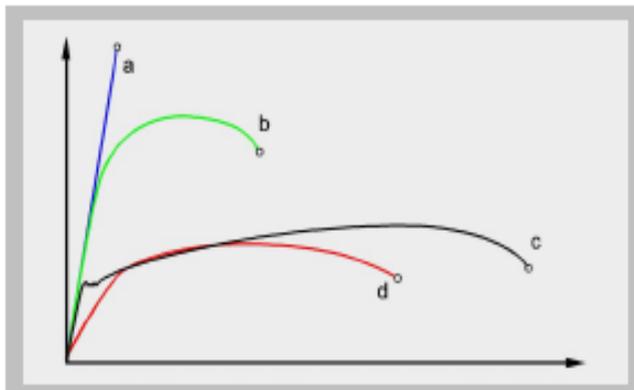


Diagrama de fuerza-alargamiento para diferentes materiales de muestras:
 a) acero templado
 b) acero de bonificación
 c) acero dulce recocido
 d) aluminio aleado

Nº de artículo

020.30000 WP 300 Aparato de Ensayo Universal, 20kN

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

Accesorios disponibles

Nº de artículo	Artículo
020.30001	WP 300.01 registrador mecánico
020.30002	WP 300.02 probetas de tracción, aluminio, cobre, acero, latón
020.30003	WP 300.03 probetas Brinell, aluminio, cobre, acero, latón
020.30004	WP 300.04 dispositivo de flexión
020.30005	WP 300.05 2 placas de compresión con elementos de sujeción
020.30006	WP 300.06 prueba de muelle helicoidal, 2 juegos
020.30007	WP 300.07 prueba de muelle de disco
020.30008	WP 300.08 sistema electrónico de medida de fuerza con pantalla digital
020.30009	WP 300.09 banco portátil
020.30010	WP 300.10 dispositivo para ensayo de cizallamiento
020.30011	WP 300.11 Dispositivo para el Ensayo de Embutido Profundo
020.30012	WP 300.12 lupa de medida para profundidad Brinell
020.30013	WP 300.13 dispositivo asimétrico para ensayo de cizallamiento
020.30014	WP 300.14 dispositivo de sujeción para probetas de tracción planas
020.30015	WP 300.15 ensayo de penetración de cufia angular
020.30016	WP 300.16 dispositivo para ensayo de dureza según Brinell, bola 5 mm
020.30020	WP 300.20 adquisición de datos asistida por ordenador
020.30021	WP 300.21 probetas para tracción, aluminio
020.30022	WP 300.22 probetas para tracción, cobre
020.30023	WP 300.23 probetas para tracción, acero
020.30024	WP 300.24 probetas para tracción, latón
020.30025	WP 300.25 probetas planas para tracción, aluminio, cobre, acero, latón
020.30031	WP 300.31 probetas Brinell, aluminio
020.30032	WP 300.32 probetas Brinell, cobre
020.30033	WP 300.33 probetas Brinell, acero
020.30034	WP 300.34 probetas Brinell, latón
020.30041	WP 300.41 probetas para embutición, aluminio
020.30042	WP 300.42 probetas para embutición, cobre
020.30043	WP 300.43 probetas para embutición, acero
020.30044	WP 300.44 probetas para embutición, latón
020.30052	WP 300.52 probetas para cizallamiento, cobre

ANEXO III: FICHA TÉCNICA DEL DURÓMETRO PCE-HT-225A



Durómetro PCE-HT-225A (martillo Schmidt) durometro de mano mecánico para comprobar la resistencia del hormigón

Este durómetro en forma de martillo para comprobar el hormigón se basa en el principio de medición de Schmidt. El durometro de sencillo manejo se utiliza fundamentalmente en el sector de la construcción, además de otros sectores industriales (comprobación de la dureza Wickel de la mercancía en rollos...). La comprobación se realiza siempre bajo una misma energía de prueba de 2207 J. La energía cinética de rebote inicial viene dada en el durómetro como una medida de la dureza del hormigón, de la presión sobre la superficie o de la resistencia a la presión (kg/cm^2 o su conversión a N/mm^2). La calidad del hormigón se valora principalmente en base a su resistencia a la presión, ya que es un valor orientativo para comprobar la capacidad de carga y la durabilidad de las construcciones de hormigón. La resistencia a la presión se representa con una serie de cifras y letras. Por ejemplo: B 25 quiere decir que se trata de un hormigón normal con una resistencia a la presión de 25 N/mm^2 . Existen diferentes valores intermedios hasta llegar a la clase superior de resistencia B 55. Con nuestro durometro podrá clasificar el hormigón de manera sencilla, rápida y precisa. El durómetro se entrega calibrado de fábrica, pero se puede solicitar un certificado de calibración ISO opcional (pago adicional). En este [enlace](#) dispone de una visión general desde la cual podrá encontrar cualquier tipo de durómetro que pueda necesitar. Si tiene alguna pregunta sobre el durometro, consulte la siguiente ficha técnica o pongase en contacto con nosotros en el número de teléfono 902 044 804 para España, para Latinoamérica e internacional +34 967 513 895 o en el número +56 2 562 0400 para Chile. Nuestros técnicos e ingenieros le asesorarán con mucho gusto sobre este durometro y sobre cualquier producto de nuestros [sistemas de regulación y control](#), [medidores](#) o [balanzas](#).

PCE Ibérica S.L. | Mayor 53 – Bajo | 02500 Tobarra (Albacete)
Tel: +34 967 543 548 | Fax: +34 967 543 542 | Email: info@pce-iberica.es
<http://www.pce-iberica.es/>



- Construcción muy sólida.
- Cuerpo de rebote especial para realizar innumerables comprobaciones de hormigón
- Manejo muy sencillo
- Tabla de conversión en la parte posterior
- Ayudas correctoras de los resultados de medición en las instrucciones de uso
- Certificado de calibración ISO opcional

Tabla en la parte posterior durómetro

REBOUND VALUE R	150	160	170	180
25	180	170	140	12
26	168	165	158	11
27	210	200	185	15
28	220	210	185	16
29	238	230	195	18
30	260	238	210	19
31	260	250	220	18
32	280	265	234	18
33	290	280	254	21
34	310	290	270	20
35	320	310	280	20
36	340	320	290	21
37	350	340	310	21
38	370	350	320	21
39	380	370	340	22
40	400	380	350	21
41	410	400	370	22
42	425	415	380	22
43	440	430	400	22
44	460	450	420	23
45	470	460	430	23
46	490	480	450	23
47	500	495	480	24
48	520	510	490	24
49	540	525	500	24
50	550	540	510	24
51	570	560	530	25
52	580	570	550	25
53	600	590	560	25
54	over 600	over 600	over 600	25
55	over 600	over 600	over 600	25



Durómetro para hormigón PCE-HT-225A

Información general sobre la resistencia a la presión en el hormigón

La resistencia a la presión se define generalmente como la medición resistencia a la ruptura al aplicar una carga de presión en un eje durante un periodo breve de tiempo. La resistencia a la presión del hormigón se determina teniendo en cuenta la influencia de las siguientes magnitudes:

- Resistencia del bloque de cemento
- Composición y compactación del hormigón
- Tiempo y condiciones de almacenado
- Dimensiones y forma del elemento de comprobación

PCE Ibérica S.L. | Mayor 53 – Bajo | 02500 Tobarra (Albacete)
 Tel: +34 967 543 548 | Fax: +34 967 543 542 | Email: info@pce-iberica.es
<http://www.pce-iberica.es/>



- Tipo y duración de la carga

La resistencia a la presión se determina normalmente en laboratorio en cubos de hormigón o en cilindros rectos circulares. En el caso de los cilindros, una vez retirado el hormigón sobrante se recomienda establecer inmediatamente una capa de ajuste que será muchas veces necesaria para obtener una superficie de presión lisa y plana. Los cilindros se endurecen constantemente. Puesto que en la práctica no se puede realizar una comprobación con métodos de laboratorio, se utiliza el durómetro con forma de martillo de sencillo manejo y que proporciona una precisión considerable.

Especificaciones técnicas

Rangos de medición	100 ... 600 kg/cm ² (~ 9,81 ... 58,9 N/mm ²)
Precisión	±18 kg/cm ² (~ ±1,8 N/mm ²)
Energía percutora	2207 J
Indicador de medición en la escala frontal	0 ... 100 (sin dimensiones)
Escala para la resistencia a la presión en la parte posterior	para convertir los valores del indicador sin dimensiones a kg/cm ² (con introducción del ángulo) en las instrucciones de uso
Tabla correctora de los valores de medición	70 cm
Espesor máximo del hormigón (del material)	diámetro de 66 x 280 mm
Dimensiones	1 kg

Contenido del envío

1 Durómetro PCE-HT-225A (método Schmidt), 1 barra de esmeril redonda, caja de transporte de madera e instrucciones de uso

Componentes adicionales

- **Calibración de laboratorio con certificado:**
Certificado de calibración ISO (para empresas que deseen incluir el durómetro dentro de sus herramientas de control internas o para realizar la recalibración anual.
El certificado ISO contiene una calibración de laboratorio con un documento en el que se incluyen todos los valores de medición.



Aquí encontrará otros productos parecidos bajo la clasificación "Durómetro":

- [Durómetro PCE-DX-A \(Shore A\)](#)
(mecánico, shore A, para goma blanda, caucho y elastómero, sin aguja de arrastre)
- [Durómetro PCE-A \(Shore A\)](#)
(mecánico, para goma blanda, caucho y elastómero, con certificado)
- [Durómetro PCE-D \(Shore D\)](#)
(mecánico, para goma dura y termoplástico rígidos, con certificado)
- [Durómetro PCE-O \(Shore O\)](#)
(mecánico, para tejidos enrollados y hilo en bobinas, con certificado)
- [Durómetro PCE-HT200 Shore A](#)
(durómetro digital para medir la dureza de goma blanda, caucho y elastómeros)
- [Durómetro PCE-HT210 Shore D](#)
(durómetro digital para medir la dureza de goma dura y termoplásticos (plásticos))

PCE Ibérica S.L. | Mayor 53 – Bajo | 02500 Tobarra (Albacete)
Tel: +34 967 543 548 | Fax: +34 967 543 542 | Email: info@pce-iberica.es
<http://www.pce-iberica.es/>



ANEXO IV: FICHA DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL PLASTIFICANTE



plais

plastificante para hormigones y morteros

Edició:6 Abril de 2010

Departamento Técnico

Descripción:

Plais N es un plastificante para morteros y hormigones, que resulta ideal para conseguir una excelente plasticidad facilitando enormemente su manejabilidad y mejorando su colocación en obra.

Características técnicas:

Color/es: marrón oscuro.

Densidad: 1,03 Kg/L. (+-) 0,05 g/cm³.

PH: 7 ± 1

Contenido en solidos: > 25%

Rendimiento:

Aplicaciones:

Plais N se utiliza cuando se requiere mejorar la trabajabilidad de morteros y hormigones, para reducir ligeramente la relación A/C, para conseguir una mejor terminación de las piezas moldeadas, para aumentar la resistencia mecánica. Aumenta la cohesión evitando la segregación, aumenta la resistencia del mortero endurecido ante las heladas. No modifica los tiempos de fraguado y endurecimiento.

Propiedades y ventajas:



plais

FACILITA LA PUESTA EN OBRA MEJORA LA TRABAJABILIDAD MEJORA LAS PROPIEDADES DE LA MEZCLA FRESCA Y ENDURECIDA

Preparación de la superficie:

No procede.

Modo de aplicación:

- Agitar el contenido del envase para conseguir la correcta homogeneización del producto.
- Plais N se añade al agua de amasado en la proporción de 1L. por cada 2.500 Kg. de cemento.
- Por cada saco de cemento de 35 kg, se agregan 12 cc de Plais N al agua de amasado.
- Si se aprovecha la posibilidad de reducir la relación A/C se puede obtener una mejor resistencia del mortero.

Limpieza de las herramientas:

Con abundante agua limpia.

Almacenamiento:

Durante 3 años en sus envases originales, bien cerrados, en lugar seco, fresco y a temperaturas superiores a 4 °C.

Presentación:

La información aportada en esta ficha técnica y en particular las recomendaciones relativas a la aplicación y uso del producto se basan en nuestros conocimientos actuales y son aportadas de buena fe, considerando que los productos son utilizados, manejados, aplicados y almacenados en situaciones normales y dentro de los plazos de su vida útil. Las posibles diferencias entre los materiales, soportes, condiciones reales en el lugar de la aplicación son tales que no se puede establecer una relación de garantía con el presente documento ni ninguna otra información aportada. El usuario debe verificar mediante una prueba de idoneidad que el producto se adecua al uso requerido. Los usuarios deberán remitirse a la información de la última edición de la ficha técnica, copia de las cuales le serán entregadas a su requerimiento.



SOLUCIONES PROFESIONALES PARA LA CONSTRUCCIÓN ©TEAIS S.A. - Todos los derechos reservados - Avda. da Enerxía, nº 153, Pol. Ind. de Sabón - 15143 Arteixo, A Coruña Telf.: 981 600 966 - Fax: 981 601 508 - Email: info@teais.es

ANEXO V: FICHA DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL CEMENTO

CEMENTO
COSMOS

CEM II/B-M (V-L) 32,5 N

Cemento Portland compuesto

Cementos Cosmos, S.A.



Principales campos de aplicación:

- Firmes de hormigón para carreteras.
- Hormigón en masa y armado en grandes volúmenes.
- Hormigón en masa.
- Morteros y albañilería en general.
- Hormigón con áridos potencialmente reactivos.
- Presas de hormigón vibrado y compactado.
- Estabilizaciones de suelos, suelocemento, gravacemento.
- Solados de pavimentos.
- Cimentaciones de hormigón en masa.
- Prefabricados no estructurales.

Consejos de utilización:

- Cuidar el almacenamiento. El granel se almacenará en lugar estanco.
 - Extremar las precauciones en la dosificación (en peso), el amasado y el curado.
 - Periodo de eficacia declarado del agente reductor de Cr (VI):
El cemento contiene reductor de Cr (VI), lo que garantiza un contenido de Cr (VI) soluble en agua inferior a 0,0002% y su periodo de eficacia declarado es:
 - Suministro en sacos: Dos meses a partir de la fecha que figura en el envase, siempre que se mantenga cerrado, en un entorno fresco y seco, protegido de la lluvia y de la humedad y aislado del suelo.
 - Suministro a granel: Un mes a partir de la emisión del albarán, siempre que se mantenga el producto en almacenamiento ó silo estanco.
- El periodo de eficacia declarado del agente reductor de Cr (VI) no será válido si se han producido manipulaciones posteriores para la fabricación de productos derivados del cemento sometidos a la directiva 2003/53/CE.

Para información detallada, vea publicaciones de IECA, AENOR y EHE.

CEMENTO COSMOS

CEM II/B-M (V-L) 32,5 N

Fábrica Integral de Toral de los Vados
CEMENTOS COSMOS, S.A.



ER-0421/1999



015001989



GA-2006/0551



SS7-01592011



0096/CPRA33/0572
UNE-EN 197-1



Suministro:

- A granel
- En sacos

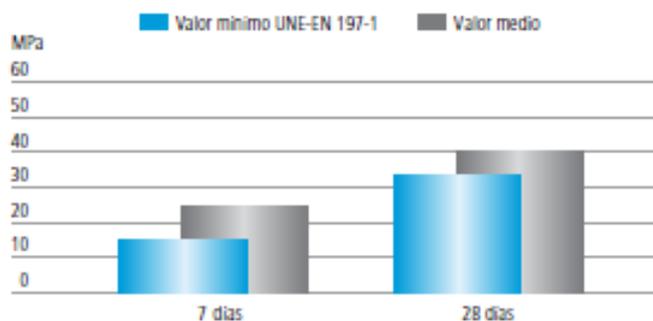
Especificaciones

Composición	Norma	Valor Habitual
Clinker	67-79 %	> 65 %
Cenizas + caliza	21-35 %	< 30 %

Exigencias químicas	Norma	Valor Habitual
Sulfatos (SO ₂)	≤ 3,5 %	< 3,0 %
Cloruros	≤ 0,10 %	< 0,003 %
Cromo VI soluble en agua (UNE-EN 196-10)	≤ 0,0002 %	< 0,0002 %

Exigencias físicas	Norma	Valor Habitual
Expansión (Le Chatelier):	≤ 10 mm	< 1,0 mm
Tiempo de fraguado		
Principio	≥ 75 min	> 200 min
Final	≤ 12 horas	< 300 min

Exigencias mecánicas	Norma	Valor Habitual
Resistencia a la compresión		
7 días	≥ 16,0 MPa	> 28,0 MPa
28 días	≥ 32,5 MPa ≤ 52,5 MPa	> 40,0 MPa < 52,5 MPa



Abril 2016 - Cementos Cosmos, S.A. - se reserva el derecho de modificar la información de esta ficha sin previo aviso.

CEMENTOS COSMOS, S.A.

Oficina Central: C/ Brasil, 56 - 36204 VIGO - Telf. 986 269 000

www.cementoscosmos.es

PEDIDOS

Tel. 900 812 120 - Fax 986 473 951

pedidos@vcea.com



ANEXO VI: FICHA DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL POLIESTIRENO EXPANDIDO



DANOPREN PR 40

DANOPREN PR 40 es una plancha rígida de espuma de poliestireno extruido (XPS) con juntas perimetrales machihembradas en diferentes espesores. Fabricado sin CFC's, HCFC's ni HFC's. Código de Designación para Mercado CE: XPS-EN13164-T1-CS(10\Y)200-WL(T)0,7-DS(70)



CAMPO DE APLICACIÓN

Aislamiento térmico en edificación.
Cerramientos con cámara, ocupando la cámara. Fachada ventilada.

PRESENTACIÓN

PRESENTACIÓN	VALOR	UNIDAD
Longitud	260	cm
Ancho	60	cm
Espesor total	40	mm
m ² por paquete	15.60	m ²
Código de Producto	482002	-



Corte perimetral y superficie



DANOPREN PR 40

DATOS TÉCNICOS

DATOS TÉCNICOS	VALOR	UNIDAD	NORMA
Espesor	40	mm	EN 823
Tolerancia de espesor	± 2	mm	EN 823
Longitud	260	cm	EN 822
Tolerancia de longitud	± 10	mm	EN 822
Ancho	60	cm	EN 822
Tolerancia de anchura	-B/+ 8	mm	EN 822
Planimetría	6	mm/m	EN 825
Rectangularidad	5	mm/m	EN 824
Conductividad térmica ⁽¹⁾	0,034	W/mK	EN 12667
Resistencia térmica	1.15	m ² K/W	EN 12667
Resistencia a la compresión ⁽²⁾	> 200	kPa	EN 826
Absorción Agua Inmersión total	≤ 0.7	Vol. %	EN 12087
Absorción de Agua por difusión	≤ 3	Vol. %	EN 12088
Resistencia hielo-deshielo	≤ 1	Vol. %	EN 12091
Factor μ de resistividad a la difusión del vapor de agua ⁽⁴⁾	≥ 80	-	EN 12086
Estabilidad dimensional	≤ 5	%	EN 1604
Reacción al fuego	E	Euroclase	EN 13501-01
Coefficiente lineal de dilatación térmica	0,07	mm/m-K	-
Rango de temperaturas de servicio	-50 / + 75	°C	-
Calor específico	1.450	J/kg K	-
Densidad nominal	32	kg/m ³	EN 1602
Capilaridad	Nula	-	-
Tratamiento de borde	Machihembrado	-	-
Tratamiento de superficie	Lisa, con piel de extrusión	-	-

(1) Conductividad térmica declarada λ_D según UNE EN 13164 (5.4.2.1; Anexo A; Anexos C.2 y C.4.1)

UNE EN 13164. Norma europea armonizada de aislamiento térmico de poliestireno extruido. Es la base del marcado CE y la Certificación Voluntaria de Producto (p.ej. AENOR).

(2) Ensayo a corto plazo; valor cuando se alcanza el límite de rotura o el 10% de deformación

(4) En productos con piel de extrusión depende del espesor: decrece a medida que aumenta el espesor

MEMORIA DESCRIPTIVA

___ m² aislamiento térmico de cerramiento con cámara, mediante planchas rígidas DANOPREN PR de espuma de poliestireno extruido (XPS), de ___ mm de espesor, con una conductividad térmica declarada λ_D = ___ W/m-K; resistencia térmica declarada R_D = ___ m²-K/W; clasificación de reacción al fuego Euroclase E, según la norma EN 13501-1 y código de designación XPS-EN13164-T1-CS(10\Y)200-WL(T)0,7- DS(TH), de acuerdo con las especificaciones de la norma EN 13164.

NORMATIVA Y CERTIFICACIÓN

Principales referencias normativas- Directiva 2010/31/UE. Eficiencia energética de los edificios- CTE DB-HE: Código Técnico de la Edificación. Documento Básico: Habitabilidad. Ahorro de Energía- Real Decreto 235/2013. Certificación energética de edificios- REGLAMENTO (UE) 305/2011. Productos de Construcción- EN 13164. Productos aislantes térmicos para aplicaciones en la edificación. Productos manufacturados de poliestireno extruido (XPS). Especificación. Marcado CE Conformidad a norma EN 13164 para todos los productos de XPS fabricados por DANOSA en Europa. Certificado de producto. Marca de Calidad. Marca AENOR concedida a DANOPREN PR, conforme a EN 13164. Gestión de la Calidad Registro de empresa BUREAU VERITAS según EN ISO 9001 concedido a la planta de fabricación de poliestireno extruido (XPS) de DANOSA en Tudela (Navarra) Registro de empresa BUREAU VERITAS según EN ISO 9001 concedido a la planta de fabricación de poliestireno extruido (XPS) de DANOSA en Leiria (Portugal)



DANOPREN PR 40

VENTAJAS Y BENEFICIOS

- Manejo fácil y seguro de las planchas DANOPREN PR de XPS: son ligeras, no irritan la piel, no desprenden polvo, mantienen su integridad física. Consecuencia: se facilita el acople y la puesta en obra.
- Absorción de agua Inapreciable a largo plazo. Dos consecuencias: 1.- Se puede efectuar el acople y la puesta en obra en condiciones meteorológicas adversas; 2.- Las prestaciones térmicas no se ven afectadas por absorción de agua a largo plazo, por ejemplo, en el caso de muros de fachada, debida a infiltraciones por lluvia-viento a través del muro de fachada o por ascensión capilar del terreno.
- Elevada resistencia a compresión, y mecánica en general, a largo plazo. Dos consecuencias: 1.- Las planchas son suficientemente robustas para aguantar trato duro en transporte y obra sin menoscabo ni de su integridad física ni de sus prestaciones como aislamiento térmico; 2.- Donde el producto se coloca bajo carga, se mantiene a largo plazo el espesor y la Resistencia Térmica (que es, obviamente, proporcional al espesor).
- Gracias a su resistencia a la humedad y a las cargas mecánicas, las planchas DANOPREN PR de XPS presentan una durabilidad pareja a la vida útil del edificio en que se incorporan. Tres consecuencias: 1.- Ahorro de energía permanente; 2.- Reducción equivalente de emisiones de CO₂, y 3.- Costes de mantenimiento (reparación, sustitución) nulos.
- Eventualmente, dependiendo del sistema de instalación original, puede ser factible la reutilización de las planchas DANOPREN PR de XPS. Como consecuencia, se puede alcanzar un nivel máximo de sostenibilidad ambiental, al cerrar el ciclo de vida del producto abriendo un nuevo ciclo de vida, dentro del concepto "cradle to cradle" (de la cuna a la cuna).

MODO DE EMPLEO

CERRAMIENTOS CON CÁMARA y FACHADAS VENTILADAS

- En caso de instalar las planchas aislantes de XPS DANOPREN PR en cámara, se comprobará que la cámara está limpia de rebabas y escombros.
- El muro soporte ofrecerá una superficie lisa y uniforme para el apoyo de las planchas DANOPREN PR.
- Gracias a la elevada resistividad a la difusión del vapor de agua (factor μ) de las planchas DANOPREN PR, no es preciso instalar barrera de vapor, pues las propias planchas presentan comportamiento de barrera suficientemente resistente en los usos y climas habituales para evitar la formación de condensación intersticial. En aplicaciones excepcionales, como pueden ser almacenes frigoríficos de congelación (temperaturas de hasta -40 grados Celsius) si hubiera que instalar barrera como tal, verificando entonces la correcta posición (en la cara "caliente" del aislamiento, que sería la exterior al propio recinto de congelación).
- En caso de necesitarse, comprobar que la fijación o pegado de las planchas DANOPREN PR al muro soporte es correcta. En cualquier caso, la rigidez y robustez de las planchas permite tener la certeza de que no se moverán o cederán tras ser colocadas, causando la aparición tanto de puentes térmicos en la cámara como de corrientes de convección entre las dos caras, "caliente" y "fría", de la cámara. Para el caso de fachada ventilada las planchas DANOPREN PR se fijarán con un mínimo de cuatro fijaciones mecánicas cerca de las esquinas y una en el centro de la plancha, o bien se adherirán al muro soporte en el 80% de su superficie.
- Las planchas DANOPREN PR presentan sus juntas machihembradas y deben ser encajadas a tope. En realidad este tratamiento de juntas en los 4 bordes de la plancha evita así del todo cualquier circulación de aire por convección entre las dos caras, "caliente" y "fría", de la cámara. De esta forma se simplifica la instalación, evitando la disposición bastante frecuente de dos capas de planchas para lograr el efecto de "matajuntas", puesto que ya se obtiene con toda sencillez gracias al machihembrado de una sola capa.
- En caso de que la cámara sea de mayor altura que la longitud de las planchas, se debe rellenar el resto de la cámara con los recortes que sean precisos para dar continuidad, evitando así la formación de puentes térmicos y de corrientes de convección en el interior de la cámara. En realidad las planchas DANOPREN PR tienen 2,60 m de longitud, para adaptarse mejor a la altura típica de la cámara, colocándose por consiguiente en vertical.
- En fachada ventilada el acabado exterior estará fijado al muro soporte o a una estructura autoportante auxiliar. Las planchas DANOPREN PR no deben soportar el peso del acabado exterior.
- En fachada ventilada se valorará el efecto de puente térmico ocasionado por las fijaciones de la hoja exterior de acabado.

INDICACIONES IMPORTANTES Y RECOMENDACIONES

- Comprobar que el producto ha llegado a obra con el embalaje original, debidamente etiquetado y en perfectas condiciones.
- Comprobar la existencia de marcado CE y Declaración de Prestaciones.
- Comprobar la existencia de marca de calidad voluntaria, si consta en el proyecto.
- Comprobar que el aislamiento térmico es el especificado en proyecto.
- Comprobar que se cumple la memoria del proyecto en lo referente a dimensiones, espesor, conductividad térmica declarada, resistencia térmica declarada, factor de resistencia a la difusión del vapor de agua y reacción al fuego.
- Comprobar que la puesta en obra se corresponde con la definición en proyecto, en particular el orden de capas de cada cerramiento y la correcta situación de la capa de aislamiento respecto de las demás.
- Comprobar la continuidad del aislamiento, evitando la presencia de puentes térmicos, en particular en las entregas a cualquier punto singular de la construcción. Ejemplos: contorno de huecos, perforaciones, perimetros, petos, forjados, pilares.



DANOPREN PR 40

MANIPULACIÓN, ALMACENAJE Y CONSERVACIÓN

- Las planchas DANOPREN sufren cambios dimensionales irreversibles si quedan expuestas durante largo rato a temperaturas altas. La temperatura máxima de servicio permanente es de 75°C.
- Las planchas DANOPREN, en contacto directo con sustancias o materiales que contengan componentes volátiles, se encuentran expuestas al ataque por disolventes. Al seleccionar un adhesivo, deberán tenerse en cuenta las recomendaciones del fabricante con respecto a la idoneidad del mismo para su utilización con espuma de poliestireno.
- Las planchas DANOPREN pueden almacenarse al aire libre. No se ven afectadas por la lluvia, nieve o hielo. La suciedad acumulada puede lavarse fácilmente. Si las planchas se almacenan durante un periodo prolongado de tiempo, deben protegerse de la luz solar directa, preferiblemente en su empaquetado original. Cuando se mantengan en un interior, este deberá estar adecuadamente ventilado.
- Es necesario mantener las planchas alejadas de fuentes de calor o de llamas. Las planchas DANOPREN contienen un aditivo que retarda la inflamabilidad a fin de inhibir la ignición accidental proveniente de una pequeña fuente de fuego, pero las planchas son combustibles y pueden quemarse rápidamente si se exponen a fuego intenso. Todas las clasificaciones en relación con el fuego se basan en ensayos realizados a pequeña escala y puede ser que no reflejen la reacción del material bajo condiciones de fuego reales.
- Para más información, consúltese la ficha de seguridad del producto.

AVISO

La información que aparece en la presente documentación en lo referido a modo de empleo y usos de los productos o sistemas Danosa, se basa en los conocimientos adquiridos por Danosa hasta el momento actual y siempre y cuando los productos hayan sido almacenados y utilizados de forma correcta.

No obstante, el funcionamiento adecuado de los productos dependerá de la calidad de la aplicación, de factores meteorológicos y de otros factores fuera del alcance de Danosa. Así, la garantía ofrecida pues, se limita a la calidad intrínseca del producto suministrado. Danosa se reserva el derecho de modificar, sin previo aviso, los datos reflejados en la presente documentación.

Los valores que aparecen en la ficha técnica son resultados de los ensayos de autocontrol realizados en nuestro laboratorio y en laboratorios independientes.

Página web: www.danosa.com E-mail: Info@danosa.com Teléfono: 902 42 24 52

ANEXO VII: MICROSCOPIO MBL3300

MBL3300 INCIDENT LIGHT MICROSCOPE

Impeccable view of detailed structures MBL3300 - Metallurgical incident light microscope

The MBL3300 is a real specialist. It is a perfect instrument for the identification and analysis of steel connections and other metals.

It is also ideal for quality assessment, raw material analysis and examining metal structures following heat treatment. This metallurgical microscope is particularly well suited for laboratory and industrial applications.

It is equipped with a phototube for connecting a camera or a video recorder.

- Object field diameter:
 - 4.5 mm with 4x/NA 0.10
 - 1.8 mm with 10x/NA 0.25
 - 0.45 mm with 40x/NA 0.65
- Maximum object height
 - 24 mm with 4x/NA 0.10
 - 23 mm with 10x/NA 0.25
 - 21 mm with 40x/NA 0.65

Power supply: 90–240 V.

A wide range of accessories is available for the MBL3300.



MBL3300

	Optical equipment	Equipment	Illumination	Special features	Application
MBL3300	10x plane eyepiece Field of view: 18 Objectives (planachromatic): 4x/NA 0.10 // object field Ø: 4.5 mm 10x/NA 0.25 // object field Ø: 1.8 mm 40x/NA 0.65 object field Ø: 0.45 mm	XY table Coaxial coarse/fine adjustment Iris diaphragm Filter holder Blue filter Green filter (optional)	6 V 30 W adjustable Incident light through objectives	Metallurgical microscope with incident light Phototube	Laboratory Material testing

ANEXO VIII: PROBETAS PEQUEÑAS TRAS SU EXTRACCIÓN DEL MOLDE



Figura ANEXO X-0-1 Probetas con hormigón de muestra (sin PCM)



Figura ANEXO X-0-2 Probetas con acetato de sodio (de arriba a abajo: 1, 2 y 3%)



Figura ANEXO X-0-4 Probetas con sodio tiosulfato (de arriba a abajo: 1, 2 y 3%)



Figura ANEXO X-0-3 Probetas con zinc nitrato (de arriba a abajo: 1, 2 y 3%)