



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Mejora de la eficiencia energética en la edificación empleando
mezclas de composites y PCM*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Carlos Roldán Pinillos

DIRECTOR: Miguel Ángel Álvarez Feijoo

CURSO ACADÉMICO: 2020-2021

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Mejora de la eficiencia energética en la edificación empleando
mezclas de composites y PCM*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Infantería de Marina

Universida_{de}Vigo

RESUMEN

La eficiencia energética se ha convertido en una línea de investigación prioritaria para todos los países, con el objetivo de reducir las emisiones y la factura energética. Y uno de los campos donde más esfuerzos se están dedicando es el sector de la construcción, centrándose este trabajo en el ámbito de la edificación.

En este trabajo se aborda el desarrollo de un compuesto de resina epoxi que adquiera la capacidad de almacenamiento de energía térmica con la adición de un material de cambio de fase (PCM), en este caso parafina refinada. A la matriz de resina epoxi se le añade también polvo de aluminio, que ayudará a distribuir mejor el calor de una manera más homogénea en toda la matriz, gracias a sus propiedades conductoras, evitando así una focalización del calor en los extremos de la matriz, y con ello, un mal aprovechamiento del compuesto desarrollado.

Empleando la metodología Box-Behnken se estudian la manera en que afectan a la matriz los distintos aditivos, tanto desde un punto de vista térmico, como mecánico. Para ello, se llevaron a cabo análisis termogravimétricos y ensayos de dureza con las diferentes probetas elaboradas.

Los resultados obtenidos de estos análisis han permitido elaborar superficies de respuesta, que permiten determinar qué parámetros tienen mayor influencia. Finalmente, tras haberse realizado las distintas pruebas y ensayos, se puede concluir que la resina epoxi es una óptima opción para ser empleada como cápsula de materiales de cambio de fase, ofreciendo con ello un gran abanico de posibles aplicaciones.

PALABRAS CLAVE

Material de cambio de fase, resina epoxi, calor latente, almacenamiento, aislamiento térmico.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecer a mis padres la educación que de ellos he recibido siempre, la cual ha forjado en gran parte la persona que soy a día de hoy, y la que me ha permitido llegar hasta aquí. Gracias por haberme inculcado siempre la ambición sana, el respeto y el espíritu de sacrificio. Gracias por haberos esforzado incansablemente en buscar lo mejor y más beneficioso para mí y mis hermanos, por educarnos en valores y ayudarnos a diferenciar lo realmente importante. Gracias por ser un apoyo en los momentos más duros, y empujarme siempre hacia delante levantándome el mentón cuando me faltaban las ganas. Gracias también por motivarme siempre a conseguir lo que me propongo, y por comprender que esta profesión es mi vocación y mi elección de vida, y por aceptarlo y ayudarme a conseguirlo. Así como por el respeto y admiración que muestran siempre hacia mi dirección de vida.

Gracias también a todas las personas que me han acompañado durante mi estancia en la Escuela Naval Militar. A mis compañeros en general, con quien he compartido actividades, períodos y clases, de los que he aprendido mucho, y con los que he disfrutado también de los momentos que nos ha regalado esta Escuela. Y en especial gracias a mis compañeros infantes, con los que he sudado, sangrado, reído, y mucho, con los que he gritado, cantado, sufrido, escalado, nadado, corrido, con los que he recorrido montañas cargados como mulas, con los que en los momentos en los que creíamos que no podíamos más, empezábamos de bromas, y es que al final la vida es eso, esforzarte al máximo y aun cuando crees que no puedes más, rodearte de gente con la que en esas situaciones te veas capaz de sacar ganas de debajo de las piedras y seguir. Gracias por ese vínculo, por ese sentido de equipo, y por tirar de mí cuando lo necesité, por esa mano en el hombro cuando lloré, y por ese empujón cuando dudé.

No quiero dejar pasar la oportunidad de agradecer también a Elena, la persona con la que he compartido y descubierto tanto estos últimos años, todo lo que aprendido con, y de ella, porque han sido cosas que de otra manera no hubiese aprendido. Gracias por las risas, los momentos bonitos, por hacer de mí una mejor persona y por hacer de mi paso por la Escuela algo especial. Gracias también por el aspecto académico, en el cual siempre me ha ayudado con las asignaturas de manera desinteresada y constante, desde luego has sido viento a favor. Un viento a favor que me ha servido de motivación, que me ha empujado a superarme, un viento que me sirvió para orientarme cuando estaba un poco perdido, que también ha hecho de mí alguien más fuerte y maduro, gracias.

Gracias a mi tutor para este trabajo, D. Miguel Álvarez Feijoo, por su atención y disposición para con mi trabajo y necesidades, las cuales siempre fueron comprendidas, atendidas y resueltas de manera satisfactoria y eficaz.

Contenido

ÍNDICE DE FIGURAS.....	iii
ÍNDICE DE TABLAS	iv
ÍNDICE DE GRÁFICAS	v
1 Introducción y objetivos.....	1
1.1 Contextualización.....	1
1.2 Objetivos del trabajo	2
1.3 Introducción	3
1.3.1 Materiales de cambio de fase (PCM).....	4
1.3.2 Orden de la memoria.....	6
2 Estado del arte.....	8
2.1 Glosario de términos y definiciones.....	8
2.2 Eficiencia energética y aislamiento térmico	9
2.2.1 Relevancia.....	10
2.2.2 Confort humano y temperatura	10
2.2.3 Materiales aislantes	11
2.3 Energía térmica y almacenamiento	11
2.3.1 Energía térmica	11
2.3.2 Almacenamiento de energía térmica.....	12
2.3.3 Calor latente	12
2.4 Resinas epoxi	12
2.4.1 Introducción, concepto y composición química	12
2.4.2 Proceso de curado de las resinas epoxi	13
2.4.3 Características	13
2.4.4 Empleo de aditivos en las resinas epoxi.....	14
2.4.5 Parámetros de la polimerización de las resinas epoxi.....	14
2.4.6 Aplicaciones.....	16
2.5 Materiales de cambio de fase (PCM).....	17
2.5.1 Principios de funcionamiento.....	17
2.5.2 Clasificación.....	17
2.5.3 Empleo de las parafinas como PCM.....	20
2.5.4 Los PCM en edificación y construcción	20
2.6 Mejora de la sostenibilidad del sistema energético.....	28

2.6.1 Reducción de la contaminación	28
2.6.2 Reciclaje.....	28
2.6.3 Resinas biodegradables	29
3 Desarrollo del TFG	30
3.1 Metodología experimental	30
3.1.1 Elección de materiales	30
3.1.2 Box-Behnken	31
3.1.3 Procedimiento empleado en la elaboración de las muestras	32
3.2 Análisis de datos	33
3.2.1 Análisis de dureza	33
3.2.2 Análisis termogravimétrico y de calorimetría de barrido diferencial	34
4 Resultados	37
4.1 Análisis de dureza	37
4.2 Análisis en el TG-DSC	39
5 Conclusiones y líneas futuras.....	45
5.1 Líneas futuras.....	46
6 Bibliografía	49
Anexo I: EJEMPLOS DE SUSTANCIAS Y MEZCLAS QUE SE UTILIZAN COMO MATERIALES PCM.	52
Anexo II: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DE PCM QUE SE COMERCIALIZAN EN EL MERCADO ACTUALMENTE.	55
ANEXO IV: CARACTERÍSTICAS 2080M 17 & M25.....	57
ANEXO V: FICHA TÉCNICA ALÚMINA MICRONIZADA TIPO 2.....	62
ANEXO VI: ESPECIFICACIONES PARAFINA REFINADA 56-58° CH PR56CH.....	63
ANEXO VII: LABORATORIO	64
ANEXO VIII: GRÁFICAS ANÁLISIS TG-DSC	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Material PCM macro-encapsulado	4
Figura 1-2 PCM micro-encapsulado y gráfica de contraste entre temperatura con, y sin PCM	4
Figura 1-3 Comparación capacidad de almacenamiento de PCM con materiales construcción.	6
Figura 2-1 Fases del proceso de curado del material epoxi.	13
Figura 2-2 Estado inicial: monómeros.	15
Figura 2-3 Crecimiento lineal y ramificación por debajo del punto de gel.....	15
Figura 2-4 Formación de un gel, reticulación incompleta: polimerización.....	15
Figura 2-5 Adquisición de polímero termoestable: curado total.	15
Figura 2-6 Clasificación materiales cambio de fase.....	18
Figura 2-7 Clasificación materiales cambio de fase de calor latente.	18
Figura 2-8 Material de construcción con compuestos que implementan PCM incorporados.	20
Figura 2-9 Aplicación por proyección.....	27
Figura 2-10 Aplicación manual.	27
Figura 3-1 Patrón de medidas de dureza shore en probetas.	34
Figura 3-2 Equipo TG y análisis termogravimétrico de una muestra.	34
Figura 5-1 Firma térmica de un carro de combate.	46
Figura 5-2 Firma térmica calor humano.....	47
Figura 5-3 Operario solventando incidencia con fuego.	47
Figura A0-1 Matrices	65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Ejemplos de los distintos tipos de aislantes.....	11
Tabla 2-2 Propiedades generales de las resinas epoxi.	14
Tabla 2-3 Confrontación ventajas e inconvenientes de sustancias orgánicas e inorgánicas.....	19
Tabla 2-4 Comparación de las características de parafinas y sales hidratadas inorgánicas.....	25
Tabla 2-5 Métodos de reciclaje de compuestos que integran PCM.....	28
Tabla 2-6 Relación entre procesos de reciclado y sus productos.....	29
Tabla 3-1 Características de resina Resoltech 2080M 17.	30
Tabla 3-2 Características del PCM elegido (Parafina refinada).	31
Tabla 3-3 Factores y puntos centrales Box Behnken.....	32
Tabla 3-4 Diseño Box Behnken para las muestras.	33
Tabla 4-1 Mediciones de dureza en la base de las probetas.....	37
Tabla 4-2 Medias aritméticas de las medidas de dureza obtenidas para las probetas.....	38
Tabla 4-3 Mediciones de dureza en la superficie lateral de las probetas.....	38
Tabla 4-4 Datos obtenidos con el software "Processing"	43
Tabla A0-1 Características de PCM comercializados actualmente. Fuente rubitherm.com.....	55
Tabla A0-2 Características parafinas de calor latente ecapsuladas. Fuente micronal.de.....	55
Tabla A0-3 Características sales hidratadas sin encapsulado. Fuente rubitherm.com.....	55
Tabla A0-4 Características sales hidratadas encapsuladas. Fuente teappcm.com	56
Tabla A0-5 Características en situación de ligado a otro material. Fuentes www.rubitherm.com / www.micronal.de / www.climator.com	56
Tabla A0 6 Porcentaje de componentes en la matriz epoxi	64
Tabla A0 7 Composición matrices	65

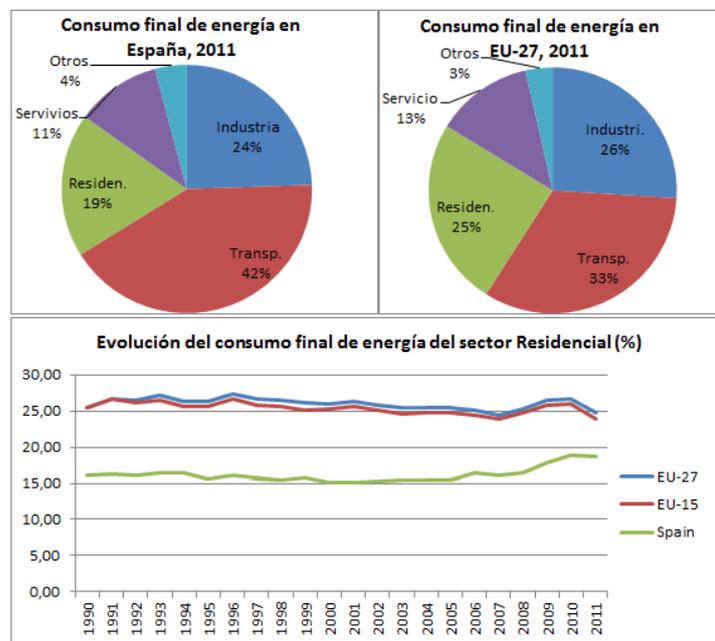
ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1-1-1 Porcentaje consumo por sectores España y UE y tendencia de ese consumo. Fuente Eurostat.....	1
Gráfica 1-2 Relación de temperatura de un cuerpo y la energía térmica aplicada a lo largo del cambio de fase.	5
Gráfica 2-1 Relación coste total y de pérdidas frente a la inversión realizada en aislantes.....	10
Gráfica 2-2 Proceso de gelificación.	16
Gráfica 2-3 Variación de temperatura del material, antes, durante y después de producirse el cambio de fase.	17
Gráfica 2-4 Relación de temperatura de fusión y entalpía de fusión.	19
Gráfica 3-1 Fases de calentamiento para el análisis termogravimétrico de las muestras.	35
Gráfica 4-1 Dureza de las tres probetas que presentan heterogeneidad en la medida.	38
Gráfica 4-2 Superficie de respuesta correspondiente a la relación de los porcentajes de PCM y Al en peso con la dureza Shore D.....	39
Gráfica 4-3 Gráfica del comportamiento del crisol vacío al ciclo programado para los análisis.	40
Gráfica 4-4 Análisis termogravimétrico muestra probeta M-1.....	41
Gráfica 4-5 Flujo de calor correspondiente a los 9 análisis TG.....	41
Gráfica 4-6 Análisis térmico de la muestra M-9.....	42
Gráfica 4-7 Superficie de respuesta de calor absorbido.....	44
Gráfica 4-8 Superficie de respuesta de calor cedido.....	44
Gráfica A0-1 Análisis TG M-1.....	67
Gráfica A0-2 Análisis TG M-2.....	68
Gráfica A0-3 Análisis TG M-3.....	69
Gráfica A0-4 Análisis TG M-4.....	70
Gráfica A0-5 Análisis TG M-5.....	71
Gráfica A0-6 Análisis TG M-6.....	72
Gráfica A0-7 Análisis TG M-7.....	73
Gráfica A0-8 Análisis TG M-8.....	74
Gráfica A0-9 Análisis TG M-9.....	75

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Contextualización

Actualmente, las edificaciones consumen aproximadamente el 25% de la energía producida y emiten más del 30% de las emisiones de carbono a la atmósfera. Y esto, junto con la actual necesidad de ahorro energético y aspectos de sostenibilidad, sitúa a la reducción del consumo energético en edificaciones como uno de los objetivos principales de estudio e investigación.



Gráfica 1-1-1 Porcentaje consumo por sectores España y UE y tendencia de ese consumo. Fuente Eurostat

De entre los principales intereses por la eficiencia energética y ahorro en este sector, encabeza la lista el aspecto económico, ya que, la inversión realizada se amortizaría con el paso del tiempo, gracias a la optimización en el consumo energético, siendo beneficioso a medio y largo plazo. Pero no es sólo el factor económico el que despierta el interés por la búsqueda de un sistema más sostenible, sino también la reducción de emisiones, como son las de CO₂, es un factor igualmente importante a tener en cuenta.

A pesar de haberse avanzado en materia de eficiencia energética de los edificios en los últimos años, se estima en aproximadamente un 30% el potencial de ahorro energético en unas futuras construcciones. Disminuir los consumos de energía en la edificación es entonces una manera óptima de conseguir una reducción de los consumos energéticos generales.

A la edificación se pueden atribuir los consumos necesarios para el funcionamiento de diferentes aplicaciones y sistemas, entre los que diferenciamos calefacción, refrigeración, agua caliente sanitaria, iluminación, ofimática, motores y máquinas y un grupo final que englobaría a aquellos consumos menores no incluidos en los anteriores. Y de éstos, los más relevantes para el ámbito del trabajo son especialmente la calefacción y refrigeración, puesto que lo se va a tratar es de minimizar esas pérdidas que se producen por medio de paredes mediante un intercambio de calor no deseado, ya sea de interior a exterior o viceversa.

Esto en la Unión Europea ha derivado en que desde 2002, tras la aprobación de la Directiva 2002/91/CE, los Estados Miembros están obligados a cumplir con unos mínimos en términos de eficiencia energética en la construcción de edificios nuevos. Para lo que se señalan como puntos clave elementos como la reducción de la demanda energética, el ahorro en el consumo de la misma, fomentar las energías renovables y perseguir los beneficios medioambientales. Y con estos puntos clave identificados se plantean una serie de estrategias para abordarlos y explotarlos, como son la arquitectura bioclimática, la eficiencia energética, la producción renovable y la bioconstrucción. También están obligados a reformar en términos energéticos las edificaciones que vayan a ser reformadas en gran medida. Como consecuencia de estas novedades, nace el término de “zero energy buidings”, que engloba a aquellos edificios que consumen cantidades ínfimas de energía y que logran reducir al mínimo su impacto en el medio ambiente.

Es en esta nueva estrategia de construcción en la que se integran diferentes técnicas de ahorro de energía tales como innovar en materiales de construcción, emplear nuevos métodos para la obtención de energía, diferentes formas de almacenaje de ésta y diferentes técnicas de ahorro energético. Con lo que se pretende fomentar la construcción de edificios que sean prácticamente sostenibles por ellos mismos dando lugar así a un gasto energético muy pequeño.

En este trabajo se profundizará en el empleo de materiales que favorezcan el almacenamiento de calor pasivo, y proporcionar así una mayor capacidad de inercia térmica a la edificación. Como son los materiales de cambio de fase (PCM). De los cuales, el margen de temperatura de cambio de fase de solidificación en la climatización, puede abarcar desde 0 °C hasta 100 °C, siendo conveniente que presenten características como las siguientes: mucha energía en el cambio de fase, que sean estables con el paso del tiempo y con los ciclos, compatibles con los materiales que los contienen y hacen de cápsula, sin problemas de toxicidad y que supongan un bajo costo. Teniendo en cuenta todos estos condicionantes y que la temperatura sea la adecuada, se reducen mucho los PCM disponibles.

1.2 Objetivos del trabajo

El fin principal del presente trabajo es estudiar la viabilidad del uso de materiales que favorezcan el almacenamiento de calor pasivo, y proporcionar así una mayor capacidad de inercia térmica a la edificación, como son los materiales de cambio de fase (PCM). Y optimizar así las propiedades térmicas de los componentes de los aislantes mediante el empleo de resinas epoxi como cápsula de PCM.

Para la consecución del objetivo principal, el proyecto se divide en tres etapas. En primer lugar, se seleccionará un PCM que se considere apropiado según las especificaciones que proporciona el fabricante, en este caso Ceras Martí, de los que se seleccionará aquel material que optimice la absorción de energía térmica, y se llevará a cabo un análisis de las propiedades de los PCM, así como el comportamiento de materiales de construcción a los que se les ha incorporado en su composición

(resinas). Para ello, se realizará un amplio análisis experimental en el que se determinarán los factores determinantes de las variables del proceso.

Procesando así, mediante la metodología Box-Behnken, las diferentes muestras de composiciones diferentes que habremos realizado, para posteriormente analizarlas y obtener gráficos de respuesta. Está también la realización del análisis de los compuestos del diseño en el equipo TG-DSC para determinar así las propiedades térmicas de los mismos. Se incluirá también la realización de un análisis de la dureza de los compuestos para comprobar la manera en la que afectan los aditivos a la resina epoxi que actúa como matriz.

Estos experimentos y ensayos permitirán apreciar y entender mejor el comportamiento térmico de distintos materiales con PCM, comprobando el grado en que el comportamiento teórico afecta realmente al flujo de calor a través de materiales en los que se implemente este sistema, ampliando así el conocimiento sobre su comportamiento real en aplicaciones y contrastando sus propiedades reales.

A continuación, partiendo de las características y conclusiones obtenidas en los ensayos a escala de laboratorio, se caracterizan este tipo de compuestos, explicando cual sería el más apropiado para emplear en edificación con el fin de mejorar la eficiencia energética.

1.3 Introducción

Para alcanzar los estándares en materia de eficiencia energética uno de los métodos que se está tratando de implementar en edificios de nueva construcción y en reformas, es el almacenamiento de energía. Existen diferentes maneras de almacenar esa energía, entre las que figura el método que se va a desarrollar en este trabajo, el almacenamiento de energía térmica por calor latente durante el cambio de fase o estado. Los materiales de cambio de fase (conocidos como PCM) son aquellos que tienen una elevada capacidad de absorber o ceder energía calorífica mientras experimentan su cambio de estado. Se pueden encontrar compuestos en los que el PCM se encuentra junto a otro material de forma que se encuentran en contacto directo. Este hecho puede generar problemas o inconvenientes cuando ambos materiales no son compatibles entre sí, por lo que se debe de aislar el material de cambio de fase previamente a ser mezclado con el otro componente de manera que se evite así el contacto entre los mismos de manera directa. En función del tamaño del material almacenado, es posible diferenciar los materiales en macro-encapsulados y los micro-encapsulados. En el caso de los PCM macro-encapsulados, éstos se encuentran almacenados en un recipiente de tamaño considerable de manera que la cápsula alberga el material en cualquiera de los estados. Entre sus principales ventajas señalamos que las propiedades del material junto con el que se coloca no se ven alteradas, pero hay que resaltar su escasa capacidad de transmisión de calor. Así mismo, se debe tener en cuenta las limitaciones que esto presenta tales como el impedimento de realizar agujeros o taladros en las superficies en las que se hayan instalado estos compuestos ya que se corre el riesgo de perder material cuando éste cambie de estado. Por otro lado, encontramos los PCM micro-encapsulados, los cuales están recubiertos de un material normalmente polimérico en partículas con un diámetro del orden de micras. Son fácilmente aplicables, y en este caso, su capacidad de transmisión de calor es mejor debido a la amplia superficie de contacto. Como desventaja, cabe destacar que las propiedades mecánicas del material donde se introducen pueden verse alteradas. Ambos métodos, tanto el de macro-encapsulado como el micro-encapsulado se tratan de procesos caros que elevan el precio de un recubrimiento con material de cambio de fase. Y es por esta razón que se busca encontrar un material en el que se pueda almacenar el PCM sin que el coste se incremente demasiado. Por ello, en el presente trabajo el objetivo es introducir partículas de material de cambio de fase en una matriz de resina epoxi. Se lleva a cabo un estudio de los posibles cambios en las propiedades mecánicas, térmicas y su resistencia a la compresión al introducir el PCM para ver si es viable el encapsulado de éste en una matriz de resina epoxi flexible.



Figura 1-1 Material PCM macro-encapsulado

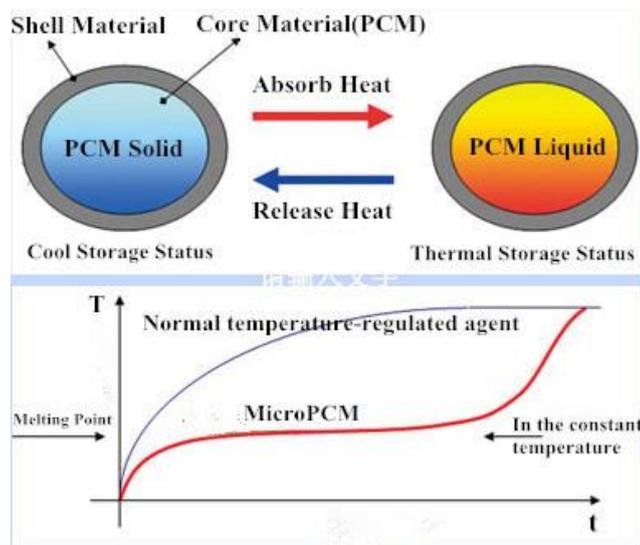


Figura 1-2 PCM micro-encapsulado y gráfica de contraste entre temperatura con, y sin PCM

1.3.1 Materiales de cambio de fase (PCM)

La inercia térmica es la propiedad que deriva de la cantidad de calor que puede almacenar y la velocidad a la que lo cede o lo absorbe un material. Dicha propiedad lleva siendo estudiada desde hace décadas con el objetivo de disminuir el consumo de energía. A partir del año 2005, los estudios realizados con materiales de cambio de fase (PCM) han aumentado de manera exponencial debido al gran interés que despiertan, destacando en el ámbito de la construcción. Éstos son introducidos en materiales constructivos con el objetivo de optimizar la eficiencia térmica. El interés en estos materiales reside en que, durante la transición de fases o estados del material, la temperatura permanece constante mientras que éste absorbe o cede energía (aprovechando el calor latente de cambio de estado). La fórmula que atiende a este principio es la siguiente:

$$Q = m \cdot L$$

Donde:

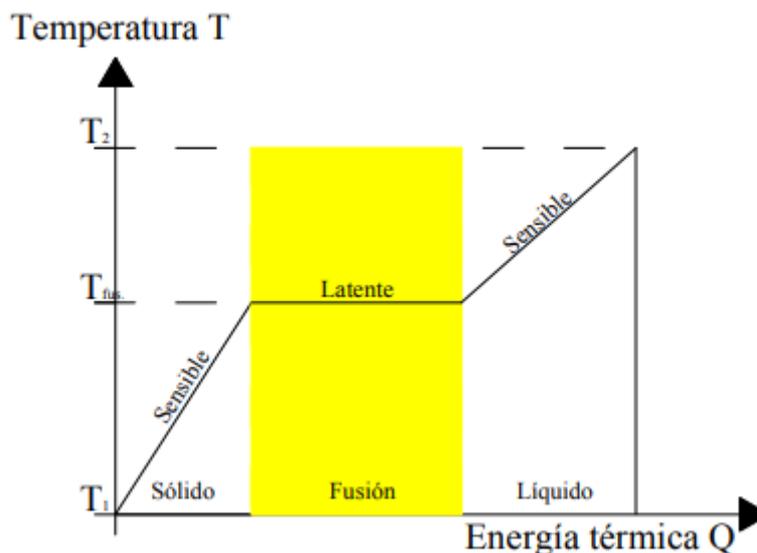
- Q corresponde con el calor necesario para que se produzca el cambio de fase.
- m corresponde a la masa.
- L es el calor latente del material.

1.3.1.1 Almacenamiento de calor latente.

La propiedad específica más relevante de un PCM es la temperatura a la que se produce su cambio de fase o estado. Las fases en las que es posible encontrar un material son: sólido, líquido y gaseoso. A pesar de que el cambio de sólido a líquido es el que menos energía acumula, es el más utilizado debido a que la variación de volumen no es muy grande comparada por ejemplo con cambios que involucren estados gaseosos, lo que supone una ventaja a la hora de emplearlo en diversos emplazamientos. Otra característica importante en la selección de este material es su temperatura de cambio de estado.

El calor que es suministrado a un sólido, provoca un incremento en la temperatura de éste hasta su fusión (cambio de fase de sólido a líquido). De esta manera se busca que el calor absorbido por el sólido produzca el cambio de fase en vez de aumentar la temperatura, y así la temperatura de la matriz se mantenga relativamente constante. Siendo este “calor potencial” u oculto lo que conocemos como calor latente. De la misma manera, cuando se ve invertido el proceso de cambio de fase, es decir, de líquido a sólido, se libera el calor latente almacenado de nuevo manteniendo la temperatura prácticamente constante. Es por esto que es posible diferenciar dos tipos de calores, el sensible y el latente.

A continuación, se muestra la diferencia entre calor sensible y calor latente, mediante un gráfico dividido en tres tramos: En el primero, la temperatura del sólido vemos que aumenta de manera proporcional a la energía térmica que recibe el mismo: calor sensible. En el segundo, sigue aumentando la cantidad de energía radiada al material, pero éste ha llegado al punto de fusión y por lo tanto emplea dicha cantidad de energía en realizar su cambio de fase. La temperatura del cuerpo se mantiene constante durante el cambio de fase: calor latente. Y en el tercero, el cuerpo habiendo cambiado de estado ya, se encuentra en estado líquido, y su temperatura experimenta un incremento proporcional a la energía térmica radiada por el medio: calor sensible.



Gráfica 1-2 Relación de temperatura de un cuerpo y la energía térmica aplicada a lo largo del cambio de fase.

A lo largo de este proceso de cambio de fase, la cantidad de calor que absorbe el material se denomina entalpía de fusión. A continuación, se comparan los espesores requeridos en distintos materiales, para obtener capacidades equivalentes de almacenamiento de calor.

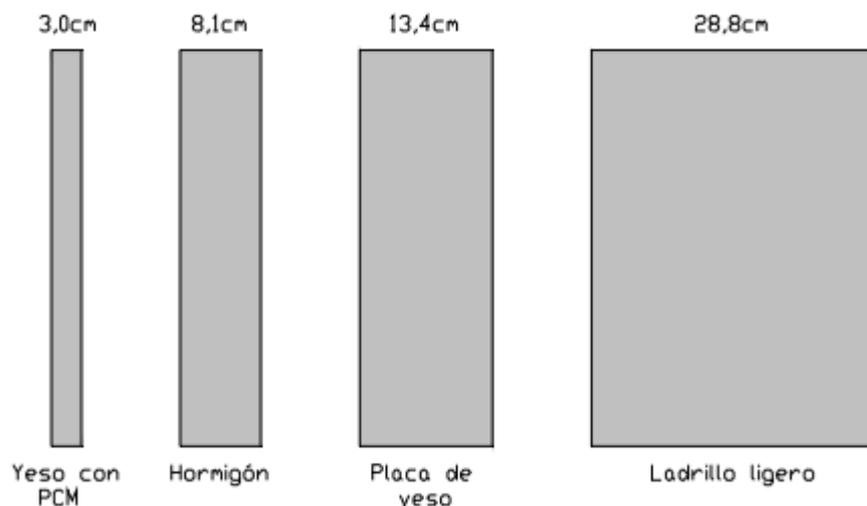


Figura 1-3 Comparación capacidad de almacenamiento de PCM con materiales construcción.

El empleo del calor latente es la ventaja del uso de los PCM. A menudo otros sistemas de almacenamiento de calor, usan únicamente el calor sensible, es decir, el cambio de temperatura del material. El calor específico de un material se define mediante la siguiente expresión:

$$Q = m \cdot C_e \cdot \Delta T$$

Donde: Q (cantidad de calor), m (masa), C_e (calor específico), ΔT (diferencia/variación de temperatura).

En una unidad de almacenamiento de calor latente, el calor sensible se ve aumentado por el calor latente. En este caso, el calor específico efectivo se define por la siguiente ecuación:

$$Q = m \cdot C_e \cdot \Delta T + m \cdot \Delta h$$

Donde Δh es la entalpía específica del cambio de fase.

1.3.2 Orden de la memoria

En este apartado se describe de manera breve la distribución de la estructura de la memoria:

- **Introducción y objetivos:** este apartado se compone de una introducción al tema que se va a tratar y trabajar, contextualizándolo en el tiempo, conceptos y términos, y avances hasta la fecha. Y demostrando la necesidad y utilidad de implementar nuevas tecnologías, sistemas y materiales que potencian el ahorro energético que hoy en día se busca e investiga, con el objetivo de disminuir costes y emisiones nocivas para el medio ambiente. También centrando el interés en el ámbito de la construcción, el porqué del estudio de los compuestos con materiales de cambio de fase.

- **Estado del arte:** tras la introducción del tema, los conceptos relacionados con el mismo y su contextualización, se aborda la situación actual del tema en sí, en concreto el empleo y utilidad de los PCM en materia de eficiencia energética en la edificación, explicando el empleo y combinación del almacenamiento de energía, de las resinas epoxi y de los materiales de cambio de fase.

- **Desarrollo del trabajo:** una vez contextualizado, se explica la metodología que se ha empleado a lo largo del desarrollo del trabajo, los estudios llevados a cabo, los equipos y materiales utilizados, así como los patrones que se han seguido para minimizar los errores en dicha metodología.

- **Resultados:** en este apartado se explican los resultados y datos obtenidos en los diferentes ensayos realizados. Como son los resultados y datos obtenidos en el análisis termográfico, en el análisis termogravimétrico, en el ensayo a compresión y en el análisis de dureza que se han realizado a cada una de las probetas de los compuestos generados. Así mismo, se explican las superficies de respuesta obtenidas en función de los distintos parámetros, realizando una interpretación de su impacto en función de las cantidades y proporciones de cada uno de ellos.

- **Conclusiones:** Una vez obtenidos los resultados, éstos se analizan, extrayéndose las conclusiones. Este apartado también incluye la explicación de las diferentes aplicaciones y los posibles futuros trabajos que se relacionen con éste.

- **Anexos:** este apartado tiene como fin recopilar documentos que son de interés tanto para la realización del trabajo, como para su análisis y comprensión, pero que debido a su extensión no deben ser incluidos en la memoria. Entre ellos se encuentran los informes de las diferentes sesiones de laboratorio en las que se explican los materiales y ensayos realizados, un manual de uso del equipo termogravimétrico y el uso de los dos softwares que incluye el equipo, tanto como para iniciar un ensayo, como para analizar los resultados obtenidos una vez realizado. Se incluyen también las gráficas obtenidas en el análisis termogravimétrico, las curvas de tensión-deformación y las fichas técnicas de los componentes utilizados.

2 ESTADO DEL ARTE

Actualmente en el ámbito de la investigación de lo relativo a la construcción existen multitud de líneas de investigación que buscan la forma de llegar al anteriormente expuesto concepto de “Zero Energy Buildings”, entre las cuales se encuentran el almacenamiento de energía, la optimización de los sistemas de calefacción, la implementación de materiales sostenibles en la construcción de edificios o la obtención de energía a través de fuentes de energía renovables, entre otras.

Esta actual necesidad de optimizar los sistemas de gestión de la energía en edificación es una de las principales razones que fundamentan los estudios acerca de los PCM, que reducirían las emisiones nocivas al medio, así como los gastos que provocan las pérdidas energéticas no deseadas.

Antes de comenzar el desarrollo del trabajo, se exponen los conceptos sobre los que se basa este trabajo y que actualmente existen en el ámbito de la investigación y construcción para minimizar las pérdidas energéticas.

2.1 Glosario de términos y definiciones

Calor específico (C_e): Cantidad de calor requerida para incrementar la temperatura de una unidad de masa de una sustancia en un grado. El Sistema Internacional de Unidades, determina que el calor específico se expresa en julios por kilogramo y Kelvin.

Otras unidades en las que también se puede expresar son calorías por gramo y por grado centígrado. Un ejemplo recurrente es el calor específico del agua, que es una caloría por gramo y grado centígrado, es decir, es necesario suministrar una caloría a un gramo de agua para incrementar su temperatura en un grado centígrado.

Calor latente (L): También conocido como calor de cambio de estado, es la energía absorbida por las sustancias al cambiar de fase o estado, de sólido a líquido (calor latente de fusión) o de líquido a gaseoso (calor latente de vaporización). Al cambiar de gaseoso a líquido y de líquido a sólido se almacena o libera la misma cantidad de energía. Sin embargo, por el contrario, el calor que se suministra cuando la sustancia no cambia de estado, aumenta su temperatura y recibe el nombre de calor sensible. Se mide en KJ/Kg.

Entalpía de fusión (ΔH_{fus}): Cantidad de energía calórica que es absorbida para que sea posible la realización del cambio de estado o fase. El material absorbe calor, pero manteniendo su temperatura constante, puesto que este calor se emplea en producir el cambio de estado. También recibe el nombre de calor latente. Se mide en J/g.

Conductividad térmica (λ): Es una propiedad física de los materiales, que consiste la capacidad de conducción de calor del mismo. Es la capacidad de una sustancia de transferir la energía calórica de sus moléculas a otras adyacentes o a sustancias con las que está en contacto. En el Sistema Internacional: λ :W/(K·m). También es posible expresarla en J/(s·°C·m). Es una magnitud intensiva. La inversa de esta magnitud es la resistividad térmica, que es la capacidad de los materiales a oponerse al paso del calor.

Transmitancia térmica (U): Es la cantidad de energía que atraviesa, en la unidad de tiempo, una unidad de superficie de un elemento constructivo de caras planas paralelas cuando entre dichas caras hay un gradiente térmico unidad. Es el inverso a la resistencia térmica. En el Sistema Internacional: U:W/(m² ·K).

El concepto de transmitancia térmica es utilizado en construcción para el cálculo de los aislamientos y pérdidas energéticas. Es de este concepto del cual se parte para los cálculos de los diseños de calefacción, en cualquiera de sus modalidades, al estar, en esencia, basada la calefacción en determinar la cantidad de energía que hay que suministrar a los espacios habitados en la unidad de tiempo (potencia) para mantener una determinada temperatura (la de confort) considerando una determinada diferencia con la temperatura exterior. Esta potencia ha de compensar las pérdidas de energía calórica por los elementos constructivos que separan los espacios calefactados del exterior o de cualquier otro ambiente a menor temperatura, es decir, se encuentra en función de la transmitancia de los elementos que definen la estancia a calefactar.

Eutéctico: Es una mezcla de dos componentes con punto de fusión (solidificación) o punto de vaporización (licuefacción) mínimo, inferior al correspondiente a cada uno de los compuestos en estado puro. Esto se da en mezclas que cuentan con una alta estabilidad en estado líquido, cuyos componentes son insolubles en estado sólido.

Subenfriamiento: Es posible apreciar este fenómeno en sustancias puras. Se produce cuando un líquido llega a su temperatura de solidificación y el mismo permanece sin congelarse ni solidificarse y permanece en estado líquido.

HVAC: Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado, se refiere a la tecnología de confort ambiental interior. El diseño del sistema HVAC es una especialidad importante de la ingeniería mecánica, basado en los principios de la termodinámica, mecánica de fluidos y transferencia de calor.

Refrigeración a veces se añade a la abreviatura del campo como HVAC & R o HVACR.

2.2 Eficiencia energética y aislamiento térmico

El intercambio de calor consiste en la cesión de calor de un cuerpo a otro que se encuentran en contacto como efecto o resultado de una diferencia de temperaturas entre éstos, con el fin de igualar de forma natural la temperatura relativa de ambos, lo conocido como un equilibrio térmico. Esta cesión se produce debido a las colisiones que tienen lugar entre las moléculas que están en contacto de un cuerpo y otro, y la dirección de dicho intercambio o flujo de calor es de la que tiene una mayor temperatura a la que tiene una menor. Por lo tanto, se define la conductividad térmica como la propiedad de un material que indica la facilidad o idoneidad del mismo para conducir calor. Por el contrario, el aislamiento térmico es la propiedad que expresa la capacidad que posee un material de oponerse a ese flujo de calor. Esta capacidad de los materiales se mide mediante la resistencia térmica. Siendo esta resistencia térmica la inversa de la conductividad térmica.

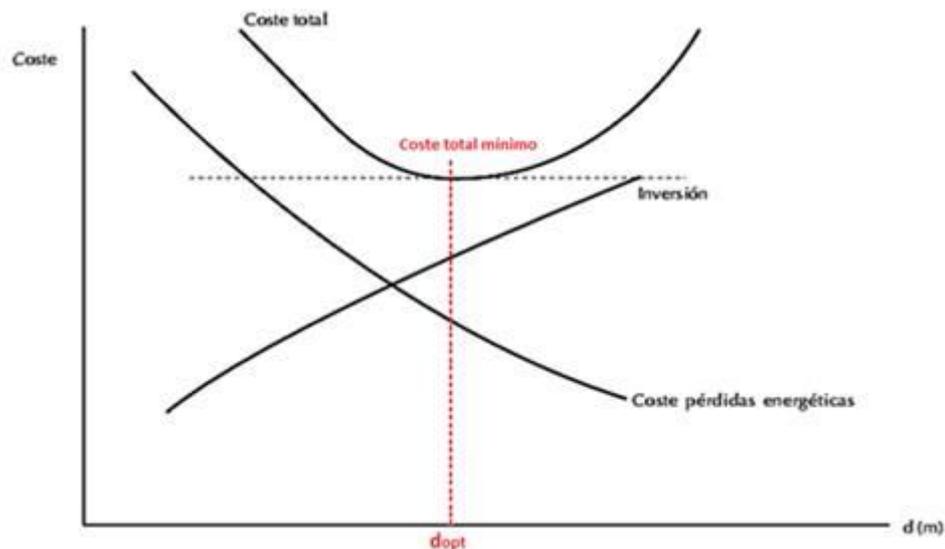
Se considera un buen aislante a un material cuyo valor de conductividad térmica sea inferior a:

$$\lambda < 0,10 \text{ W } m \cdot K$$

2.2.1 Relevancia

La eficiencia energética se basa en la optimización del modo de empleo de la energía para conseguir los mismos efectos deseados, reduciendo así el consumo de la misma. Es una práctica de gran relevancia, no sólo para el ahorro económico que puede suponer a los particulares, sino también por la reducción en la cantidad y volumen de emisiones de CO₂ que supone la generación de calor en las reacciones de combustión. Es por esta razón por la que se busca llegar a un compromiso entre el precio del aislamiento y el ahorro en el consumo de energía para producir calor, de forma que sea rentable invertir en materiales aislante a la hora de construir y reformar, respecto a las pérdidas que generaría el escatimar en gastos en este campo.

Sin embargo, cabe decir que los materiales aislantes, a lo largo de su producción, fabricación y vida útil, también son emisores de CO₂. Se ha demostrado que este tipo de materiales también contribuyen de manera negativa a las emisiones perjudiciales para el medio ambiente. Esto lleva a la necesidad de conocer cuáles son los que emiten una menor cantidad de dióxido de carbono para poder así garantizar un proyecto final sostenible que minimice los perjuicios para el medio ambiente.



Gráfica 2-1 Relación coste total y de pérdidas frente a la inversión realizada en aislantes.

2.2.2 Confort humano y temperatura

Se entiende por el término “temperatura de confort” aquella a la que el ser humano no percibe una sensación ni de frío ni de calor. Estas temperaturas varían en función de la persona y época del año, pero en términos generales oscilan aproximadamente entre los valores de 21°C y 26°C.

Como se ha expuesto anteriormente, el hecho de mantener una temperatura entre ciertos valores sin que se produzcan cambios bruscos puede ser una manera de fomentar el ahorro en el consumo innecesario de energía.

En lo relativo a la hora de determinar la temperatura a la que se debería de mantener cierto establecimiento o habitáculo, es importante el conocimiento de estas temperaturas (de confort) ya que, en el caso de pretender mantener un rango de temperaturas determinado, se deduce que lo óptimo sería que fuese entre esas, generando así unas condiciones que fomentan el bienestar de las personas que se encuentran en dicho lugar.

Por ello, en este trabajo, a la hora de seleccionar materiales el objetivo será elegir los cuales favorezcan la consecución de esas condiciones deseadas atendiendo a los agentes que pueden influir en la vida real, con unos valores razonables y dentro de lo habitual en situaciones reales.

2.2.3 Materiales aislantes

Como su propio nombre indica, el objetivo final de un material aislante es aislar, y esto se traduce en impedir o dificultar que se produzca un traspaso de calor o energía térmica entre los materiales o entornos que separa. Por ello, la característica que condiciona en mayor medida el grado en que un material es aislante o no, es que posean una conductividad térmica muy baja que sea la que dificulte y disminuya el flujo de calor.

Otra de las características comunes en este tipo de materiales, es que es habitual que posean aire u otro tipo de gas en su interior. Son estas dos propiedades las que distinguen a un material como aislante.

Pero además de por estas características, es posible distinguir a los materiales aislantes unos de otros en función de otras propiedades más específicas de cada uno, entre las que es posible resaltar:

Densidad: Correspondiente a la masa del material aislante por unidad de volumen.

Calor específico: Definido como la capacidad que posee un material de almacenar energía calorífica por unidad de masa.

Transmitancia térmica: Calor que fluye a través de un material por unidad de tiempo.

Factor de resistencia a la difusión de vapor de agua: Resistividad a la difusión de H₂O en estado gaseoso.

Resistencia térmica: Capacidad que posee el material para oponerse al flujo de calor en una determinada dirección.

La combinación de unos y otros da lugar a diversos compuestos aislantes térmicos.

En función del material aislante en sí y de la manera en la que se presenta, es posible diferenciar distintos tipos de aislantes térmicos. A continuación, se indican algunos ejemplos de cada uno:

Sintéticos	Inorgánicos	Ecológicos o naturales
Poliestireno	Lana de vidrio	Corcho
Poliuretano	Lana de roca	Fibra de madera
Policarbonato	Vidrio celular	Lana de oveja
Espuma fenólica	Arcilla expandida	Fibra de lino
Espuma elastómera	Vermiculita	Fibra de celulosa

Tabla 2-1 Ejemplos de los distintos tipos de aislantes.

2.3 Energía térmica y almacenamiento

2.3.1 Energía térmica

Se trata de la energía interna de un sistema termodinámico, y se la conoce además de por el término de energía térmica, por energía calórica o calorífica. Esta energía es proporcional a la temperatura absoluta de un sistema. Su procedencia puede ser variada, pudiendo provenir de diferentes fuentes como pueden ser el sol, una reacción exotérmica, fusión nuclear, rozamientos mecánicos, entre otras.

En este trabajo, el objetivo es determinar la cantidad de energía calorífica que se puede almacenar como calor latente, y es por esta razón por lo que la capacidad de energía térmica almacenable en los diferentes compuestos se trata de una de las propiedades más relevantes y en la que más peso recae del estudio.

2.3.2 Almacenamiento de energía térmica

En el caso concreto del tema que se va a estudiar, el almacenamiento de energía va enfocado a mantener una energía en el material de cambio de fase de manera que la preserve como una energía potencial que pueda ser emitida en el momento en que el desequilibrio de los entornos o materiales en contacto lo requiera. De manera que se impida el traspaso, por parte de la energía calórica, del aislante.

El almacenamiento de dicha energía se materializa con el cambio de fase del PCM. Siendo por tanto un almacenamiento que se consigue a través del calor latente del PCM, el cual se explica en el apartado 2.3.3.

2.3.3 Calor latente

El almacenamiento de energía por medio del calor latente es, de las distintas formas de almacenar energía que están siendo estudiadas, la que se encuentra en auge. El interés en el estudio del calor latente nace del hecho de que un material al realizar el cambio de fase se encuentra absorbiendo o cediendo energía calorífica sin que esto suponga una variación o incremento de su temperatura a lo largo del proceso. Los materiales que poseen esta capacidad de absorber una cantidad razonable de energía se denominan materiales de cambio de fase (PCM). Los estudios de estos materiales conforman los más novedosos avances en tecnologías de almacenamiento térmico, refrigeración y otras muchas aplicaciones en las que pueden ser utilizados.

2.4 Resinas epoxi

2.4.1 Introducción, concepto y composición química

Estas resinas se tratan de un material de tipo polimérico termoestable que surgen como el producto del mezclado de una base epóxica con un endurecedor. La base epóxica está compuesta de dos o más grupos epoxi, conocidos a su vez como oxiranos, que provienen habitualmente de la reacción de compuestos con hidrógeno y epiclorhidrina y siendo sometida posteriormente a una deshidrohalogenación. Existen distintos tipos de base epoxi, entre los cuales se distinguen:

- Base epoxi de bisfenol A.
- Base epoxi de bisfenol F.
- Base epoxi novolaca.
- Base epoxi de compuestos nitrogenados.
- Base epoxi cicloalifática.

Estas resinas de tipo epoxi se consiguen por lo tanto con la combinación de bases epóxicas mencionadas anteriormente y otro componente que es conocido como endurecedor. Algunos endurecedores tienen el fin de reaccionar con los grupos oxiranos, otros con los hidroxilos y otros, habitualmente conocidos como catalizadores, son los encargados de llevar a cabo el inicio de la reacción. Una vez iniciada la reacción, se empiezan a unir las cadenas de bases epóxica conformando una red. El transcurso de este proceso es conocido como curado.

2.4.2 Proceso de curado de las resinas epoxi

El curado de la resina tras la mezcla de la base con el catalizador es un proceso cuyo tiempo depende de factores como el endurecedor elegido o la temperatura a la que se realiza el curado. Se pueden diferenciar 4 fases del curado que se visualizan en la Figura 2-1.



Figura 2-1 Fases del proceso de curado del material epoxi.

2.4.3 Características

Las resinas epoxi se consideran sustancias que ofrecen altas prestaciones, debido a sus propiedades físico-químicas. Su elevada capacidad de adhesión a otros materiales, las convierte en idóneas para ser empleadas como recubrimiento. Las características de las resinas epoxi varían en función de la base epóxica que se elija, del endurecedor aplicado para el proceso de curado, de las condiciones en las que se produzca el curado y de otros factores como pueden ser los aditivos que se le incorporen a la mezcla como pueden ser polvos metálicos o PCM, que serán objeto de este trabajo, en el cual, más concretamente será aluminio en polvo. Entre las características más importantes de las resinas se pueden citar:

Propiedades

Humectación y adherencia óptimas: solubles en agua y alta resistencia a agentes corrosivos

Resistente a la humedad

Buenos aislantes eléctricos

Resistencia mecánica

Resistentes químicos

Curan con poca contracción (volumen no varía)

Buenas propiedades adhesivas

Resistencia a altas temperaturas (gran sensibilidad térmica)

No presenta grandes contracciones al finalizar el proceso de curado

Tabla 2-2 Propiedades generales de las resinas epoxi.

2.4.4 Empleo de aditivos en las resinas epoxi

Es posible introducir distintos tipos de aditivos a las resinas epoxi que modifican sus propiedades mecánicas, térmicas y físicas. El hecho de añadir estos aditivos a las matrices epoxi se hace con el fin de lograr una mayor variedad de aplicaciones. Dependiendo del fin para el que se vaya a emplear la resina, los resultados que se esperen de la misma, y, en definitiva, el uso que se le vaya a dar, se le introducirán unos aditivos u otros. Entre los que es posible encontrar fibras de carbono o de vidrio para mejorar sus propiedades mecánicas, microesferas de diferentes materiales para reducir su densidad o por ejemplo partículas de metales para optimizar sus propiedades conductoras.

2.4.5 Parámetros de la polimerización de las resinas epoxi

Una de las características que destacan de las resinas epoxi es tener cadenas poliméricas reticuladas en una estructura de tres dimensiones que resiste bien las temperaturas, y con ello a fundirse. Polimeriza irreversiblemente bajo calor o presión constante dando lugar a una masa rígida. Siendo esta la diferencia básica entre los polímeros termoplásticos y los termoestables, resistiendo estos últimos a posibles deformaciones. Es posible agregar aditivos durante el proceso de mezcla, que optimicen las propiedades físico-químicas y/o acabados superficiales.

- **Reacción de curado:** El proceso de curado de las resinas epoxi es una reacción estequiométrica compleja, debido a que el porcentaje de resina y endurecedor no es arbitrario ni modificable (es establecido por el fabricante). La química del proceso de curado comienza con la formación y el crecimiento lineal de las cadenas que pronto comienzan a ramificarse para posteriormente entrecruzarse. A medida que la reacción avanza, el peso molecular aumenta. Finalmente, varias cadenas se unen en un retículo de peso molecular infinito. A lo largo de este proceso la viscosidad de la resina aumenta hasta llegar convertirse en sólido. Además, se libera energía calorífica al producirse reacciones, provocando un incremento de la temperatura hasta alcanzar un máximo, que recibe el nombre de pico exotérmico, momento en el que la sustancia solidifica.

- **Vitrificación de las cadenas:** Este proceso de transformación se produce partiendo de un estado de líquido denso y espeso, o de gel elástico y termina con la consecución de un estado vítreo. Se inicia cuando se cumple que la temperatura de transición vítrea de las cadenas crecientes del polímero, coincide con la temperatura de curado. Y una vez se dan esas circunstancias, el curado es sumamente lento. Desde

un punto de vista práctico, el proceso de vitrificación supone una parada violenta del curado. Siendo este proceso un fenómeno reversible.

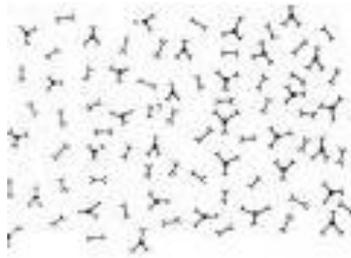


Figura 2-2 Estado inicial: monómeros.

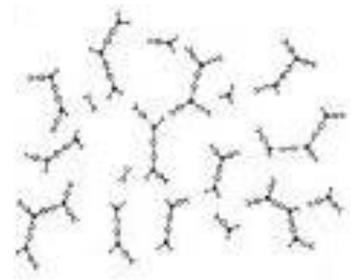


Figura 2-3 Crecimiento lineal y ramificación por debajo del punto de gel.

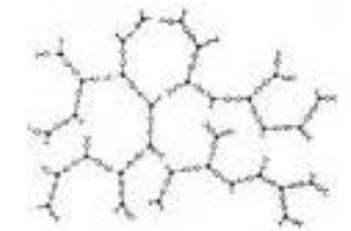


Figura 2-4 Formación de un gel, reticulación incompleta: polimerización.

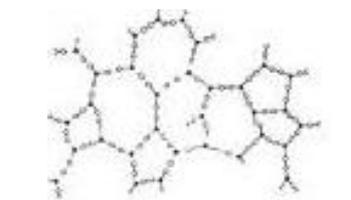
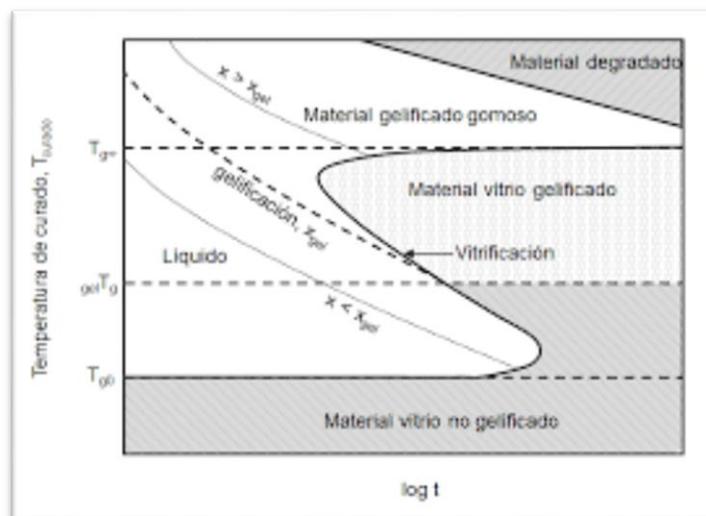


Figura 2-5 Adquisición de polímero termoestable: curado total.

• **Gelificación:** Fase en la cual, el material pasa de encontrarse en estado líquido viscoso a un estado de gel elástico. Se produce rápidamente y es irreversible. El proceso de gelificación se produce en una subfase concreta del proceso reactivo. Depende directamente de la estequiometría de las especies reactivas de la funcionalidad. Tras producirse la gelificación, la reacción prosigue hasta la formación de un retículo infinito, con un incremento de la temperatura de transición vítrea (T_g) y de las propiedades físicas.



Gráfica 2-2 Proceso de gelificación.

2.4.6 Aplicaciones

El espectro de campos de aplicación de este tipo de resinas es muy variado debido a las propiedades que se pueden modificar con la adición de distintos agentes a la resina. Este aspecto las convierte en un material polivalente en numerosos ámbitos de la ingeniería, medicina o arquitectura. De entre los campos en los que se emplean las resinas epoxi se pueden destacar:

1. Electrónica: como aislante eléctrico, conmutadores o encapsulado de transistores.
2. Aeronáutica: en alas o colas de aviones ejerciendo de refuerzo a altas presiones y temperaturas.
3. Construcción: es el ámbito en el que son más utilizadas, destacando el uso como adhesivo, acabados superficiales o elementos estructurales.
4. Medicina: se han desarrollado prótesis de resinas epoxi para humanos y animales por su solidez y resistencia.

En lo referido a la química de las resinas epoxi, y los distintos tipos de curado disponibles en la industria, este tipo de resinas permite a los polímeros extender el uso de las resinas termoestables a numerosas ramas de la ingeniería y ciencia.

Todo lo cual, trae consigo la ampliación del alcance comercial de este tipo de resinas, que extiende un amplio catálogo de resinas epoxi, lo que supone un abanico de alternativas:

- Resinas para aplicar en superficies verticales.
- Resinas transparentes para mejorar el acabado superficial.
- Resinas reforzadas de aluminio u otras cargas metálicas.
- Resinas de baja viscosidad, denominadas de infusión.
- Resinas insensibles a la humedad.

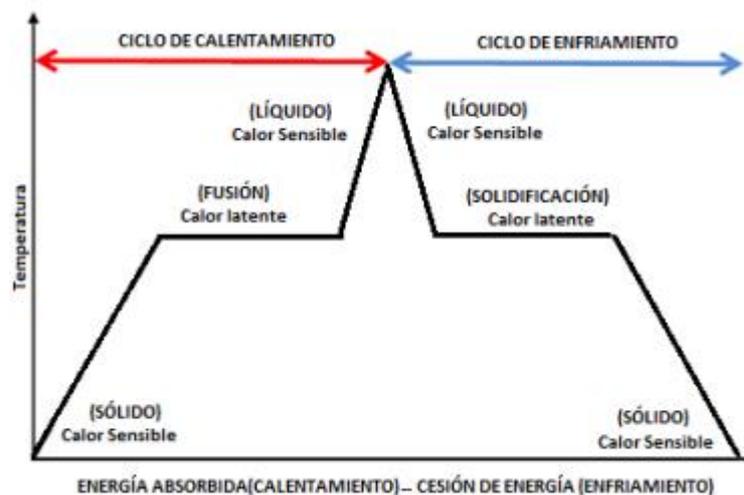
2.5 Materiales de cambio de fase (PCM)

2.5.1 Principios de funcionamiento

Estos materiales reciben su nombre porque emplean la energía térmica para llevar a cabo un cambio de fase. Las propiedades que los caracterizan son su punto de función, y su capacidad de almacenar o liberar grandes cantidades de energía, especialmente en forma de calor latente. Este tipo de sustancias destacan por tener unas excelentes capacidades de absorción y cesión de energía térmica derivadas de los procesos de cambio de fase o estado (fusión y/o solidificación), conocidos como calor sensible.

El modo en que este sistema funciona es sencillo, se lleva a cabo un estudio del rango de temperaturas en las que se pretende que cambie de fase el PCM. Para el desarrollo del presente trabajo se dispondrá de una matriz polimérica (base de resina epoxi), la cual se utilizará para que desempeñe la función de cápsula para el PCM en estado sólido, de manera que, si se produce un aumento de la temperatura del elemento a recubrir, el núcleo del material absorberá la energía calorífica (en forma de calor latente) a temperatura constante (isoterma). Como consecuencia de esto, el material se fundirá cambiando de estado sólido a estado líquido. Y cuando se produzca un descenso de la temperatura, el núcleo del material cederá calor por conducción, solidificando y devolviendo energía calorífica al ambiente.

Los materiales que almacenan energía en forma de calor latente son ideales en las siguientes aplicaciones: cuando exista una gran densidad energética, cuando el volumen y el peso sean limitantes en el sistema, y cuando se necesite obtener la energía almacenada a una temperatura constante.



Gráfica 2-3 Variación de temperatura del material, antes, durante y después de producirse el cambio de fase.

2.5.2 Clasificación

Los materiales de cambio de fase almacenan energía por lo que se ha definido anteriormente como calor latente. El cambio de fase de sólido a líquido es el que más aplicaciones tiene en el mundo de la construcción de entre todos los posibles por caracterizarse por minimizar las variaciones de volumen. Por ello, se considera a los PCM que trabajan con el cambio de sólido a líquido como aquellos con las características más interesantes para construcción, a pesar de ser el cambio de fase con menor capacidad de almacenamiento de energía. La clasificación de este tipo de PCM se realiza atendiendo a si son orgánicos o no y si son compuestos o mezclas eutécticas, tal. Cabe destacar de entre las características de cada uno de los diferentes tipos, alto calor latente de los primeros, con también mayor densidad y

mayor conductividad térmica. De los inorgánicos destaca su estabilidad termoquímica, resistencia a la corrosión, su disponibilidad y coste.

➤ Según su naturaleza:

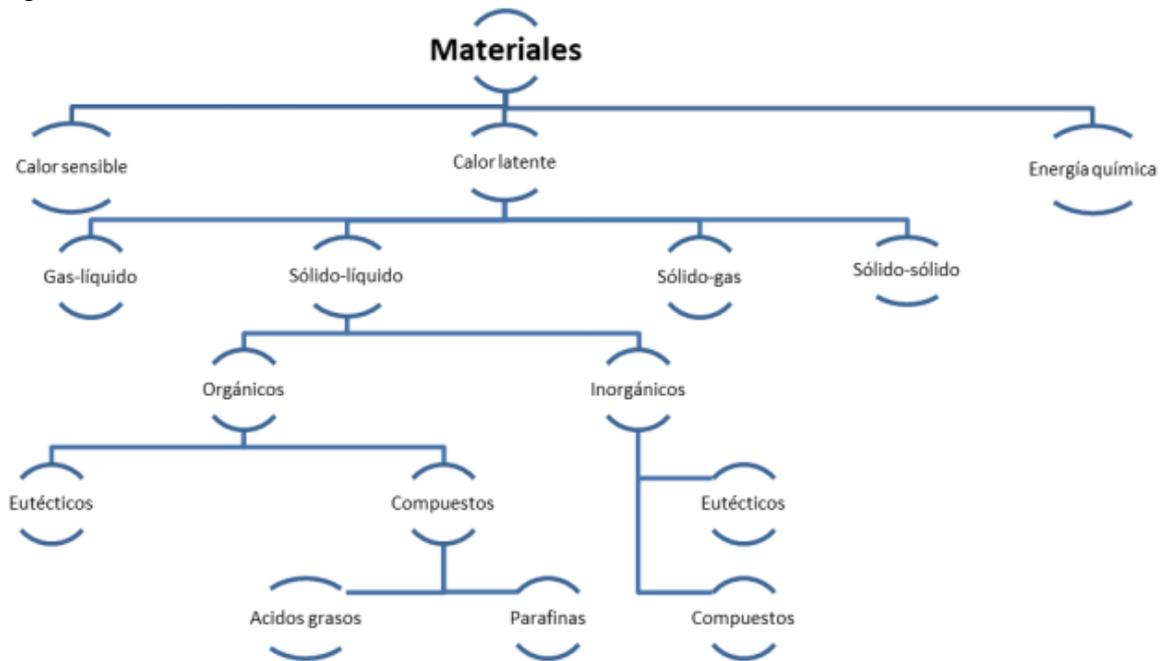


Figura 2-6 Clasificación materiales cambio de fase.

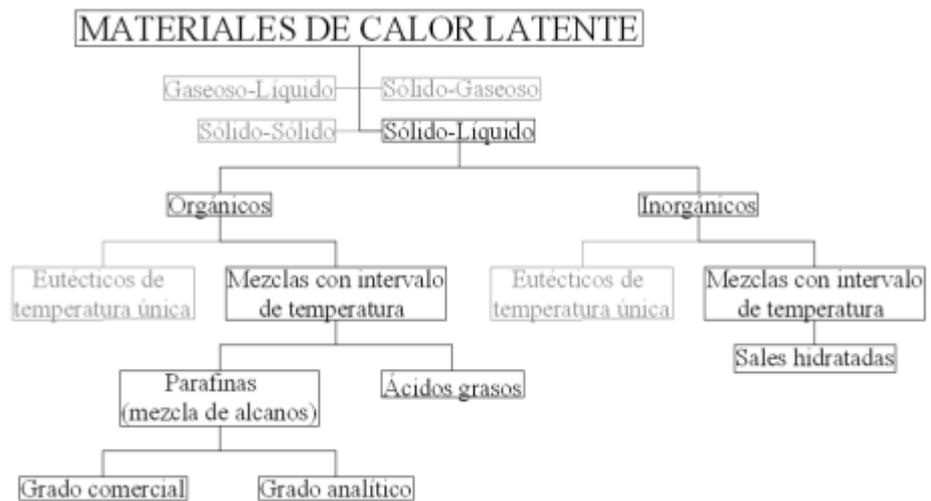


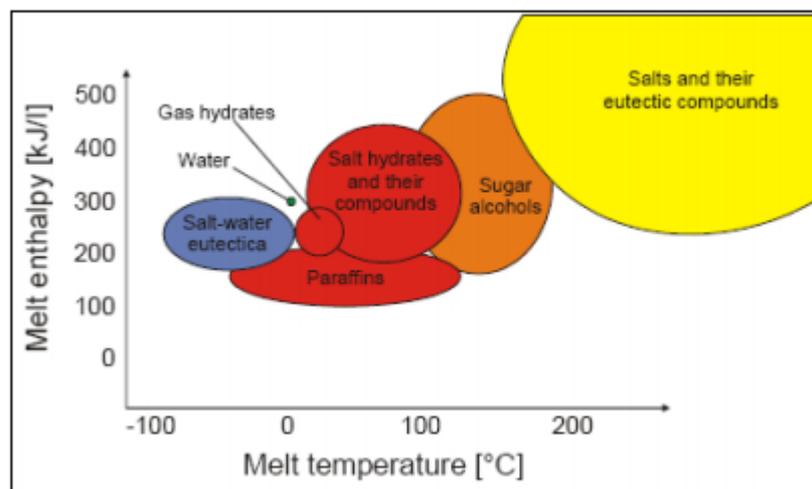
Figura 2-7 Clasificación materiales cambio de fase de calor latente.

A continuación, se numeran ventajas e inconvenientes de sustancias orgánicas e inorgánicas.

	ORGÁNICOS	INORGÁNICOS
VENTAJAS	<ul style="list-style-type: none"> -Muy fáciles de utilizar. -No corrosivo. -Bajo o nulo subenfriamiento. -Estabilidad química y térmica -Mayor rango de temperaturas de fusión. -Ecológicamente inocuos. -Más fácil de encapsular 	<ul style="list-style-type: none"> -Mayor entalpía de fase de cambio. -Mayor conductividad térmica. -No inflaman. -Menor coste económico. -Menor cambio de volumen durante el cambio de fase. -Biodegradables
INCONVENIENTES	<ul style="list-style-type: none"> -Menor entalpía de fase de cambio. -Menor conductividad térmica. -Inflamabilidad. -Mayor coste económico. -Mayores cambios de volumen durante el cambio de fase. 	<ul style="list-style-type: none"> -Corrosión con metales. -Subenfriamiento. -Separación de fases. -Segregación de fase, falta de estabilidad térmica. Necesitan aditivos. -Bajas temperaturas de fusión. -Más difíciles de encapsular.

Tabla 2-3 Confrontación ventajas e inconvenientes de sustancias orgánicas e inorgánicas.

➤ Según el rango de fusión en el que actúan



Gráfica 2-4 Relación de temperatura de fusión y entalpía de fusión.

Como se puede observar, las mezclas eutécticas de sal son adecuadas para utilizarlas en cuando la temperatura sea menor de 0° C. Los hidratos de gas con gases disueltos en el agua bajo presión son apropiados cuando la temperatura oscila entre 0° C y 20° C. Las sales hidratadas y las parafinas es posible utilizarlas en rangos mucho más amplios de temperatura, pasando los 100°C. Para el uso en

edificación con temperaturas dentro del rango de confort humano (por debajo de 21°C sensación de frío, y por encima de 26°C sensación de calor), los materiales PCM más adecuados y utilizados, son las parafinas.

En el desarrollo de este trabajo se va a trabajar con parafina refinada.

2.5.3 Empleo de las parafinas como PCM

Las parafinas se encuadran dentro del grupo de los materiales de cambio de fase de tipo orgánico. Los cuales se caracterizan por contar con propiedades que los convierten en útiles para distintas aplicaciones, siendo introducidos en elementos constructivos para lograr ese almacenamiento de energía que se pretende alcanzar. De entre las propiedades de los PCM orgánicos, se puede destacar: que cuentan con un amplio abanico de temperaturas de fusión, lo que hace posible su uso en una gran variedad de aplicaciones en función de los requerimientos de la temperatura de cambio de fase, son tanto químicamente, como térmicamente estables, no son corrosivos y son compatibles con otros materiales empleados en la construcción.

Precisamente de entre los PCM orgánicos, destacan las aplicaciones que implementan el uso de las parafinas como material de cambio de fase. Se tratan de mezclas de hidrocarburos saturados que son obtenidas del petróleo mientras es refinado o sintéticamente. Lo que hace interesante a las parafinas son las características que posee, convirtiéndolas en un material idóneo para su introducción en materiales constructivos y ser empleadas como método de almacenamiento de energía. De entre estas características destacan:

- Inodoras, insípidas y no son tóxicas.
- Rango aproximado de temperaturas de 30°C a 90°C.
- Alto calor específico y alto calor de fusión.
- Estables hasta 250°C aproximadamente.
- Su volumen de expansión se estima alrededor de un 10%, siendo este valor aceptable.

Los PCM en general, también cuentan con desventajas como pueden ser su baja conductividad térmica o que son potencialmente inflamables, sobre todo los orgánicos., los cuales también, por lo general, resultan económicamente más caros que los inorgánicos.

2.5.4 Los PCM en edificación y construcción

Hasta ahora, la adición de materiales de cambio de fase a elementos constructivos como método de almacenamiento de energía se ha venido centrando sobre todo en el uso de cementos como matriz retenedora del PCM.



Figura 2-8 Material de construcción con compuestos que implementan PCM incorporados.

A día de hoy existen ya numerosos estudios y construcciones de vanguardia en las que se logra una eficiencia térmica considerable debido al empleo de PCM en los materiales de construcción. Ejemplos de estas construcciones punteras son aquellas que hacen uso de materiales como el que se puede ver, en la que se puede observar un ladrillo de construcción en cuyo seno retiene una macrocápsula con PCM en su interior.

2.5.4.1 *Material puro*

Parafinas de calor latente

Es el nombre común referido a un grupo de hidrocarburos alcanos. Lo que se denomina molécula simple de la parafina, deriva del metano. La parafina en estado sólido, es lo que se conoce como ceras de parafina.

En cuanto a características, destacar que la capacidad calorífica específica de parafinas de calor latente es de 2,1 kJ/(kg·K). Mientras que su entalpía de fusión se encuentra entre 120 y 160 kJ/kg, factor el cual es muy elevado para los materiales orgánicos. Es la combinación de estos dos valores lo que provoca una densidad de almacenamiento de energía extraordinario. Como consecuencia, la capacidad de calor por volumen o masa de las parafinas, es cuatro o cinco veces mayor que la del agua.

Tanto el almacenamiento de energía calórica, como la liberación de la misma, lo llevan a cabo a temperaturas relativamente constantes. No tienen ningún efecto de sobre enfriamiento.

Sales inorgánicas hidratadas

Consisten en una composición de hidratos de sales y compuestos inorgánicos. Las sales hidratadas poseen una serie de hidratos y una forma anhidra que induce a la estratificación de los materiales y la pérdida por tanto de recuperación de calor latente con el paso del tiempo. Estas sales también presentan una cierta tendencia de enfriamiento secundario, lo que optimiza su rendimiento con la introducción de aditivos. Con esto se logra llevar a cabo el cambio de fase a temperatura constante y el proceso es posible repetirlo a lo largo de muchos ciclos sin variaciones en sus propiedades físicas o químicas. La sal que es más utilizada es el sulfato de sodio, a la cual se le añadirán aditivos y agua.

Tiene densidad de material de 1,0 kg/l o incluso más, propiedad que lo convierte en un material muy adecuado para ser utilizado en la industria de la construcción, en refrigeración tanto pasiva como activa, en elementos de pared y aires acondicionados. Son materiales de baja inflamabilidad. Además, cabe destacar que el producto es higroscópico, por lo que si es almacenado en un recipiente no completamente independiente, el material es posible que absorba la humedad, modificándose así las propiedades del mismo.

Si comparamos las características de parafinas y sales hidratadas inorgánicas, obtenemos una tabla como la siguiente:

TÉRMICAS	PARAFINAS	SALES HIDRATADAS INORGÁNICAS
Fase de cambio de temperatura	Las temperaturas de cambio de fase del producto son prácticamente constantes a lo largo de su vida útil.	Para garantizar que no cambien estos valores en las sales hidratadas a lo largo de los ciclos, han de tener aditivos en su composición.
Cambio de entalpía	Menor cantidad en el cambio de fase.	Mayor cantidad en el cambio de fase.
Conductividad térmica	Baja conductividad térmica. Este factor que a priori es desventaja, se puede compensar con grandes áreas de calor de superficie de transferencia del material de almacenamiento de energía calórica. Esto se logra con los PCM encapsulados y ligados, donde se genera una superficie mayor.	Tienen una mejor conductividad térmica que las parafinas debido a que cuentan con agua en su composición.
Capacidad de almacenamiento de calor	Presentan el resultado de una cristalinidad distintiva debido a su composición especial. Esto desarrolla una capacidad de almacenamiento de energía calórica extraordinaria, incluso en rangos pequeños de temperatura. Valores de capacidad de calor del orden de los de las sales hidratadas.	Valores de capacidad de calor del orden de los de las parafinas.
Intervalo de fusión	-20°C y 120°C	21°C y 31°C

FÍSICAS	PARAFINAS	SALES HIDRATADAS INORGÁNICAS
Variación de la densidad	Cada material, cuando lleva a cabo el cambio de fase, varía su densidad y con ello también su volumen. Lo que puede generar algunos problemas en determinadas aplicaciones. Por ello, si se utiliza un recipiente cerrado, es necesario prever para la expansión de volumen de puro PCM, con el fin de evitar una presión excesiva.	
Volumen de expansión	Mayor porcentaje del volumen de expansión. Hasta el valor de 16%.	Menor porcentaje de volumen de expansión. Menores al 5%.
Alta densidad	Más densa en sólido que en líquido. Menor densidad que las sales hidratadas.	Más densa en sólido que en líquido. Más densidad que las parafinas.
Subenfriamiento	Muy bajo o nulo.	Limitación sobre el subenfriamiento. Requiere aditivos para que comience la solidificación de la sustancia.

QUÍMICAS	PARAFINAS	SALES HIDRATADAS INORGÁNICAS
Estabilidad	<p>Son duraderas y estables durante los ciclos de cambio de fase. Esto es debido a que no hay ninguna reacción química a lo largo del proceso de almacenamiento de energía térmica, ni del propio material, ni con el medio de transporte de esta energía calórica, ni con los materiales de construcción empleados en las aplicaciones. La solidificación y fusión son procesos puramente físicos, que es el motivo por el cual la capacidad de almacenamiento de calor, se mantiene en un nivel elevado durante toda la vida de trabajo de la unidad.</p>	<p>Requieren aditivos. Material higroscópico. Son duraderas y estables durante los ciclos de cambio de fase, siempre que no varíe la humedad de su ambiente, ya que es un material higroscópico, y nunca deben estar en contacto con metales, ya que se producirá corrosión. En la fusión y solidificación, al ser procesos físicos, no sufren desestabilizaciones.</p>
Franja de trabajabilidad	<p>Para ambos materiales existe un rango de temperatura indicado para su trabajabilidad. En las sales hidratadas es mucho menor.</p>	
Inflamabilidad	Son inflamables	No son inflamables
Compatibilidad con los materiales de envasado	<p>Las parafinas de calor latente son químicamente inertes a prácticamente todos los materiales. Es esta reactividad química tan baja, el origen del término “parafina”, que deriva de la expresión latina “parum affinis”, que significa “prácticamente químicamente inerte”.</p>	Corrosivos
Toxicidad, contaminación, reciclabilidad.	<p>Son ecológicamente inofensivas, no producen efectos adversos sobre las plantas, animales o microorganismos. Son clasificadas como sustancias no peligrosas para el agua (en caso de fusión por encima de 27°C) y son 100% reciclables. Además, no son tóxicas ni peligrosas para la salud.</p>	<p>No tóxicos. Sin encapsulado, son amenaza para el agua. Clase de peligro 1 (WGK)</p>

ECONÓMICAS	PARAFINAS	SALES HIDRATADAS INORGÁNICAS
Coste económico	Más caras	Más baratas
Durabilidad	+ 10.000 ciclos	Necesitan aditivos

Tabla 2-4 Comparación de las características de parafinas y sales hidratadas inorgánicas.

2.5.4.2 Material micro-encapsulado

El proceso de encapsulación de los PCM ha generado interés en la comunidad de la investigación, y esto deriva en la existencia de estudios acerca de las ventajas y desventajas de las distintas posibilidades que existen de geometrías para la encapsulación de los PCM, los distintos materiales empleados y sus compatibilidades, tales como los llevados a cabo por autores como Lane. Los aspectos más relevantes sobre el principio de almacenamiento de calor latente son: la velocidad de reacción y, sobre todo, la proximidad a la superficie con la que interactuará el PCM. La opción óptima es incluir en el material de construcción un PCM que nos proporcione una mayor superficie en comparación al volumen y una elevada capacidad de almacenamiento. Es en esto en lo que consiste un PCM micro-encapsulado.

Propiedades y ventajas:

- El producto se mantiene siempre seco por estar envuelto con una envolvente cerrada. El calor latente se localiza en el núcleo de la micro-cápsula.
- El cambio de estado, con su correspondiente variación de volumen, se produce en el interior de cada microcápsula, por lo que no es visible desde el exterior. Así mismo, en el interior de los materiales de construcción, y es por eso que provoca que estos se encuentren estables en términos de tamaño. Tienen volumen y espacio reducidos, pero con amplia capacidad de almacenamiento.
- Elevada tasa de intercambio de calor por la elevada relación S/V. 1gr PCM = 30m² de superficie.
- Es posible integrarlo directamente en el material de construcción, es decir, se puede emplear sin necesidad de los procesos de trabajo adicional o de una mayor complejidad en la obra
- Mecánicamente aguanta ciclos de alta resistencia.
- Subenfriamiento nulo.
- Sometido al procesamiento correcto, no existe peligro de daños a las envolventes de tamaño microscópico. De manera opuesta a los materiales macro-encapsulados, soporta al tratamiento mecánico de los materiales de construcción (por ejemplo, perforación por taladro, corte, etc) sin producirse daños que alteren su eficacia.

2.5.4.3 Material PCM consolidado a otro

En gran número de aplicaciones, debido a razones de comodidad o especialización de los operarios que intervienen en la construcción, las grandes comerciales han generado y desarrollado un abanico de gamas de PCM consolidados a otros. El material PCM (habitualmente parafina de calor latente), se introducen en el interior de una estructura secundaria de apoyo, como sílice, compuestos orgánicos, fibra... Este proporciona una matriz en la que el PCM se distribuye de manera homogénea. Es posible que en función del material que se emplea como “estructura” sean necesarios aditivos. Cuando se alcanza la temperatura de fusión del PCM, se inicia la transformación del mismo en un líquido en el interior de

la estructura de apoyo. La acción combinada de las fuerzas capilares del material denominado de apoyo y los aditivos especiales del cross-linking asegura que no se produzcan pérdidas de PCM, incluso encontrándose en estado líquido. Lo que significa que siempre se desarrolla el proceso con material “seco”, aislado de las condiciones externas en cuanto a humedad. Los espacios que quedan libres en el interior del material consolidado, dan cabida a la expansión en volumen del PCM que ocurrirá dentro de la estructura y no será evidente, por estar encerrado. Manteniéndose, por lo tanto, su forma sólida macroscópica a lo largo de los procesos de cambio de fase.

Propiedades y ventajas:

- Independientemente de la geometría de los contenedores, al ser un material granulado, permite su llenado de manera completa.
- Conserva su forma macroscópica sólida a lo largo del proceso de cambio de fase. El PCM se encuentra ligado a la estructura secundaria del soporte, por lo que, en estado líquido, no se escapa del granulado. El resultado del producto exteriormente es siempre seco y se prescinde del manejo de líquidos.
- El modo en el que el material almacena el calor latente genera la necesidad de una gran superficie para que se produzca dicha transferencia de calor. Existiendo diversas posibilidades válidas en lo relativo al tamaño del granulado.
- En el caso de tomar como granulado un material orgánico poroso, éste es ecológicamente inofensivo, sin efectos adversos sobre las plantas, animales o microorganismos, siendo además no tóxico y completamente reciclable.
- Químicamente inerte.
- Elevada capacidad de almacenamiento de energía térmica. Tanto almacenamiento de calor, como la liberación del mismo, se producirán a temperatura relativamente constante.
- No se produce expansión de volumen a lo largo del cambio de fase.
- Sin efectos de sobre enfriamiento.
- Prolongada vida del producto, con un rendimiento estable por medio de los ciclos de cambio de fase.
- Rango de temperaturas de fusión entre aproximadamente -4 a 80°C.

2.5.4.4 Productos de construcción que incluyen PCM en su composición

Mezcla de yeso y PCM

Se trata de una mezcla de yeso con material PCM. Está específicamente formulado con el objetivo de ser empleado directamente en obra como mortero seco. Es posible emplearlo para realizar acabados en cualquier superficie por medio de métodos de proyectado o aplicado manual. Por medio de la variación del espesor de la capa aplicada, la cantidad de PCM que almacena calor latente se puede controlar en función de las distintas necesidades o requerimientos.



Figura 2-9 Aplicación por proyección.



Figura 2-10 Aplicación manual.

Otras aplicaciones para las que se pueden emplear son, desde fabricación de baldosas con el objetivo de lograr un acabado de superficie discontinuo, hasta como envolvente de tubos capilares en sistemas de refrigeración por medio del empleo de agua.

Derivados de la tecnología sándwich:

Consiste en un panel sándwich con superficies metálicas y con núcleo de espuma rígida de poliuretano. Los paneles térmicos de alta eficiencia han venido siendo desarrollados para techos con PCM. La manera en que se emplea tiene como fin hacer del sistema de refrigeración un sistema renovable, así como amortiguar los picos de carga.

Bloques de hormigón:

Se tratan de bloques de hormigón celular que se caracterizan por ser buenos resistentes frente a la acción del fuego, por tener una buena capacidad de almacenamiento de calor latente, unas positivas características de insonorización, así como ambientales. El flujo del frente de calor a través de la pared exterior es contenido en parte por el componente activo del PCM. Lo que resulta de esto es una piedra altamente aislante que presenta pequeñas fluctuaciones de temperatura en la superficie de la pared interior de la U del mismo valor. Sistema el cual proporciona temperaturas interiores de tendencia más constante.

Placas de yeso con PCM incorporado:

Consistentes en paneles de yeso los cuales cabe la posibilidad de integrarlos en la construcción de forma rápida y sencilla con los conceptos innovadores de construcción en seco.

Algunas de las ventajas son las siguientes:

- Su utilización y manejo es sencilla, no existe diferencia con la construcción convencional o estructural.
- Optimiza la tecnología de encapsulación para su posterior incorporación en edificios.
- En materia de consumo energético y valoración del edificio, lo que produce es una reducción del consumo convencional de energía del aire acondicionado.

2.6 Mejora de la sostenibilidad del sistema energético

Son varias las ventajas medioambientales y energéticas que a continuación se enuncian y explican, que supone la implementación de los recubrimientos térmicos que cuentan con PCM en su composición, y los postratamientos ofertados por el mercado para su continua producción y reducción de la cantidad de materia residual.

2.6.1 Reducción de la contaminación

Con la introducción en sistemas, y una adecuada combinación de PCM con el resto del sistema generador de frío, se logra reducir el coste económico de explotación y las emisiones de CO₂ a la atmósfera. Si estos pudieran llegar a reciclarse podría suponer ahorros significativos en materia de energía, así como una reducción de emisiones que resultan contaminantes. Es por esta razón por la que es preferible en el desarrollo del trabajo emplear parafinas por su naturaleza orgánica, la cual permite reducir los costes de explotación y las emisiones de CO₂ a la atmósfera. Por medio del recorte en las horas de trabajo de las instalaciones de climatización o calefacción se produce el ahorro de combustible, debido a que la parafina es capaz de emitir la energía que procede de la acumulación debida al cambio de fase, haciendo una función similar, si lo trasladamos al campo de la física, que ejercería un volante de inercia, aportando energía adicional que se encuentra almacenada cuando ésta cesa. Las emisiones de CO₂ generadas tanto por las calderas como por las bombas de calor, varían en función de la eficiencia energética de estos equipos y del tipo de combustible. En las bombas de calor eléctricas, la electricidad utilizada para el accionamiento de las mismas, lleva implícita la emisión de CO₂ en las centrales de generación eléctrica, a lo que hay que sumar las pérdidas por transporte y distribución de la energía eléctrica (Efecto Joule¹), mientras que el empleo de protectores térmicos concentraría los esfuerzos en un intercambio térmico disminuyendo las pérdidas de energía y reduciendo las emisiones de sistemas de refrigeración.

2.6.2 Reciclaje

Para elegir factores como la aplicación de procesos físicos, por medio del uso de utillaje mecánico, tecnologías químicas, térmicas, o una combinación de las anteriores, se hará en función del tipo de sustancia que constituye la matriz del material compuesto. Por lo general, las matrices poliméricas, son materiales no renovables que provienen de fósiles o que necesitan gran cantidad de energía para su producción. En la actualidad, estos materiales composites termoestables son demandados como material de reciente innovación debido a la obtención de resultados positivos, a pesar de su difícil reciclado.

Combustión	Lecho Fluidizado	Pirólisis	Hidrólisis en agua supercrítica	Químicos y Mecánicos
------------	------------------	-----------	---------------------------------	----------------------

Tabla 2-5 Métodos de reciclaje de compuestos que integran PCM.

¹ Se conoce como efecto Joule al fenómeno irreversible por el cual, si en un conductor circula corriente eléctrica, parte de la energía cinética de los electrones se transforma en calor debido a los choques que sufren con los átomos del material conductor por el que circulan, elevando la temperatura del mismo.

En este ámbito, como se evidenciará en el apartado de resultados, será de especial relevancia el tipo de PCM elegido, por tratarse de parafinas orgánicas, su elevado contenido en carbono posibilita su post-tratado por medio de biodegradación y el empleo de agentes microbianos que favorecen la eliminación de materiales de las corrientes de desperdicio. Además, dependiendo de lo que se pretenda obtener a cambio, es posible acoplarlo a otros tipos de técnicas de reciclaje.

El hecho de que los productos reciclados cuenten con una demanda en el mercado se convierte en un requisito fundamental. Para lo que se debe procurar una calidad apropiada que cumpla los requerimientos, así como establecer precios que sean competitivos en relación con los productos originales.

En definitiva, el reciclaje supone un incremento de las prestaciones en todos los ámbitos, pero especialmente en lo relativo al aspecto económico y ambiental, debido a que evita la explotación de recursos primarios y escasos.

Relación reciclado-producto

1. Combustión	Recuperación energética por medio de incineración: puede ser total o parcial.
2. Procesos de lecho fluidizado	Recuperación energética, así como de las fibras.
3. Pirolisis	Recuperación de aceites de resina y fibras: degradación
4. Hidrólisis en agua supercrítica	térmica o despolimerización en ausencia de oxígeno (300-800°C).
5. Químicos	Recuperación de fibras: implica disminuir el tamaño de las
6. Mecánicos	partículas hasta transformarlo en 6. Mecánicos polvo fino.

Tabla 2-6 Relación entre procesos de reciclado y sus productos.

2.6.3 Resinas biodegradables

En la actualidad, con la búsqueda e inversión que está llevando a cabo en todo lo relativo a la sostenibilidad, y en productos y servicios cada vez más ecológicos, se desarrolla también una rama en la investigación y desarrollo de las resinas biodegradables. A día de hoy uno de los esfuerzos reales con dicho objetivo, es el proyecto “ECOXY”. Cuya finalidad principal se basa en la producción de resinas epoxi biológicas y refuerzos de fibra como base de nuevos composites de durabilidad prolongada con similar condición de termoestables, orientados a funcionalidades avanzadas: reparabilidad, reprocesabilidad y reciclabilidad. Otros ejemplos de tendencias encuadradas el mismo marco biotecnológico, son las resinas “GREENPOXY”, que sustituyen el consumo de recursos minerales por recursos vegetales. Son materiales bio-compatibles que están desarrollándose también en distintos ámbitos de la medicina.

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Metodología experimental

3.1.1 Elección de materiales

Para el desarrollo del presente trabajo se presenta la necesidad de elegir tanto la resina epoxi, como el material de cambio de fase que se van a emplear para los ensayos y pruebas. Dichos materiales constituyen las dos claves para este trabajo, por lo que lo primero es determinar los objetivos que debe cumplir el compuesto que se formará con ellos: debiéndose tratar de una resina epoxi la cual sea capaz de almacenar una cantidad de PCM determinada y poder ser empleada como recubrimiento o elemento complementario en construcciones y objetos.

En lo relativo a la elección de la resina epoxi, debido a la amplia variedad de aplicaciones que tiene, el mercado ofrece un gran abanico de resinas con diferentes fines. El proveedor de las resinas para este caso es Castro Composites por razones como son la cercanía, disponibilidad y experiencias previas.

La resina escogida por sus características es la “resoltech 2080M 17”.

Resoltech 2080M 17

Sin etapa quebradiza después de la formación de espuma

Curación necesaria

Perfecta compatibilidad con preimpregnados y resinas epoxi incluso durante su polimerización

Excelente resistencia al agua

Gran mejora de las resistencias térmicas y mecánicas en comparación con las espumas epoxi existentes.

Estructura homogénea de la espuma

Sin emisión de COV

Tabla 3-1 Características de resina Resoltech 2080M 17.

Así mismo, los criterios de selección en los que basamos la elección del material PCM a emplear, son los que a continuación se relacionan:

1. **Propiedades físicas:** no ha de presentar una variación de volumen excesiva durante el proceso de cambio de fase, así como que su densidad a lo largo de las dos fases ha de ser similar.

2. **Propiedades cinéticas.**

3. **Propiedades químicas:** Ha de ser químicamente estable con el fin de evitar que se produzcan oxidaciones. El proceso debe ser reversible y el PCM no debe ser inflamable.

4. **Propiedades térmicas:** En cuanto a la temperatura de cambio de fase, ésta ha de estar acotada en un intervalo discreto o que su rango de temperaturas no sea muy extenso. Debe contar con valores elevados de calor específico y entalpía de cambio de fase, con el fin de optimizar su capacidad de almacenamiento térmico.

5. **Económicos:** Su coste económico ha de ajustarse al presupuesto, atendiendo al fin que se pretende lograr y a su vida útil.

Por esa razón, la elección de los materiales de cambio de fase se ha realizado atendiendo a las necesidades del objetivo del trabajo. Se pretende seleccionar un material cuyo cambio de fase se produzca dentro del intervalo de entre 20°C y 90°C para simplificar el estudio del almacenamiento de energía, que sea también estable químicamente, cuyo proceso de cambio de fase sea reversible y que su coste económico no sea muy elevado. De entre los distintos tipos de materiales de cambio de fase que podemos encontrar, se han escogido las parafinas, por ser las que más se ajustan a las necesidades del proyecto. Concretamente se ha seleccionado la parafina refinada 56°C-58°C CH, la cual ha sido adquirida del proveedor Ceras Martí.

PCM	Características
Parafina refinada 56°C-58°C CH	<ul style="list-style-type: none"> -Punto de fusión entre 56°C-58°C -Semi-opaca en estado sólido. -Completamente refinada y desodorizada. -Bajo contenido en aceite y alta dureza.

Tabla 3-2 Características del PCM elegido (Parafina refinada).

3.1.2 Box-Behnken

Este método busca generar las superficies de respuesta tiene con el fin de determinar en qué porcentaje una variable independiente puede llegar a afectar a una respuesta considerada de interés. Recientemente se ha extendido más el uso de este tipo de métodos analíticos, pretendiendo así su optimización. Es importante resaltar la cantidad de ventajas que aporta la aplicación de estas técnicas, tales como la optimización del número de ensayos a realizar, lo que suele resultar en la reducción al número necesario mínimo de los mismos, y por ello, la reducción también del material empleado, suponiendo un ahorro.

El inicio de la realización de esta técnica viene marcado por la determinación de los factores que se pretenden utilizar como variables en las muestras y las respuestas que se pretenden optimizar. Los factores vienen dados por las condiciones que influyen directamente a la variable de respuesta. Los factores que vamos a utilizar en este trabajo son el porcentaje en peso de material de cambio de fase que

introducimos en la muestra y el porcentaje en peso de polvos de aluminio que se añade con el fin de aumentar la conductividad térmica.

La respuesta corresponde a la variable que se ve afectada en función de las diferentes combinaciones de factores de los que se van variando los porcentajes. En el caso concreto de este trabajo se estudia cómo afectan esos factores a la dureza de las muestras, así como a la cantidad de calor que son capaces de almacenar y cómo se ve afectada también la resistencia a la compresión de las distintas muestras con la variación de esos factores.

El número de experimentos que resultan ser necesarios, se obtiene por medio de la fórmula correspondiente al análisis de Box-Behnken:

$$N = 2n(n - 1) + C0$$

Donde n corresponde al número de factores y $C0$ al número de puntos centrales. Se ha demostrado que el diseño de Box Behnken es más eficiente que otros diseños cuando se ha sometido a comparaciones con otros diseños de superficie de respuesta. Otra ventaja de la utilización de este método es que no contiene combinaciones en las que la totalidad de los factores se encuentren en sus valores máximos o mínimos, lo que permite evitar condiciones extremas y con ello, resultados no deseados. Por el contrario, este tipo de diseños no serán los indicados cuando se pretendan estudiar respuestas en dichos extremos.

Factor	+1	0	-1
% PCM	10	20	30
% Aluminio	5	10	15

Tabla 3-3 Factores y puntos centrales Box Behnken.

3.1.3 Procedimiento empleado en la elaboración de las muestras

El fin que se persigue en este apartado es definir y explicar el método que se ha seguido en la elaboración de las muestras de resina epoxi y material de cambio de fase. En todas las muestras se ha seguido el mismo procedimiento con el ánimo de evitar que diferentes variables como pueden ser el tiempo de mezclado o el orden en el que son añadidos los aditivos puedan ser factores que terminen influyendo en los resultados finales obtenidos.

A lo largo de la elaboración de las muestras, así como en todos los trabajos y ensayos llevados a cabo en el laboratorio, se ha hecho uso de diferentes herramientas y materiales de laboratorio los cuales se relacionan en el anexo de laboratorio (Anexo VII: Laboratorio). El método de elaboración seguido ha sido el siguiente:

1. Se pesan las cantidades correspondientes a cada muestra del PCM, así como del polvo de aluminio en la balanza y se vierten en un vaso de plástico, mezclándolos hasta conseguir una mezcla homogénea.
2. Se pesa en un vaso de plástico la base epoxi y se vierte en el vaso con la mezcla de aluminio y PCM.
4. Se pesa el endurecedor en un vaso, atendiendo al porcentaje indicado por el fabricante en la ficha técnica que se adjunta (Anexo IV), y se procede a introducirlo en el vaso con la base epoxi y se mezcla anterior.

6. Se mezcla durante 90 segundos, comprobando que la mezcla resultante quede homogénea. Una vez se obtiene la mezcla homogénea en el vaso, se procede a verter en el molde de probetas, donde posteriormente se deberá revisar que no queden residuos de gases en las muestras en forma de burbujas de aire que puedan alterar o afectar a las propiedades mecánicas de la mezcla.

Todas las muestras son preparadas en el laboratorio de materiales a una temperatura ambiente media de 21°C. Encontrándose ésta dentro del rango que indica el proveedor como óptimo para el proceso de curación de la resina epoxi (19°C-25°C).

En la tabla se pueden apreciar las diferentes cantidades de aditivos para añadir en cada una de las muestras de resina epoxi. Posteriormente cada una de ellas será sometida a un análisis de dureza y un análisis termogravimétrico para así obtener las superficies de respuesta.

Para generar la matriz de combinaciones se ha utilizado el software STATGRAPHICS. En el caso estudiado se ha escogido un diseño de dos factores con 3 puntos centrales, de manera que las muestras que, atendiendo a la fórmula, resultan necesarias, ascienden al número de 7 combinaciones para obtener la superficie de respuesta. En la tabla se pueden ver las combinaciones necesarias combinando los distintos niveles.

	MUESTRAS	PCM	Al
M-1	1	-1	-1
M-2	2	-1	0
M-3	3	-1	1
M-4	4	1	-1
M-5	5	1	0
M-6	6	1	1
M-7	7	0	-1
M-8	8	0	0
M-9	9	0	1

Tabla 3-4 Diseño Box Behnken para las muestras.

3.2 Análisis de datos

3.2.1 Análisis de dureza

Con el fin de determinar si la adición de materiales afecta a esta propiedad, y en qué grado lo hace, se somete a las probetas del Box-Behnken a un ensayo de dureza.

La dureza, según la prueba a la que se someten las probetas, consiste en la capacidad de un material a resistir la penetración de una aguja sobre la que se ejerce una fuerza. Para la realización de dicho ensayo, en este trabajo se ha empleado un durómetro PCE-DX AS, el cual ha sido proporcionado por el laboratorio de materiales del CUD.

La dureza se mide de 0 a 100 en dos posibles escalas (A o D), en función de lo duro que pueda resultar un material. Cuanto más duro sea un material, más resistencia ejercerá a la penetración de la aguja y el resultado será un número mayor. La escala A es utilizada para materiales más blandos, mientras que la escala D es empleada para los más duros. Se puede aproximar 90A a 40D. Es recomendable emplear la escala D cuando las medidas tomadas superan los 90A.

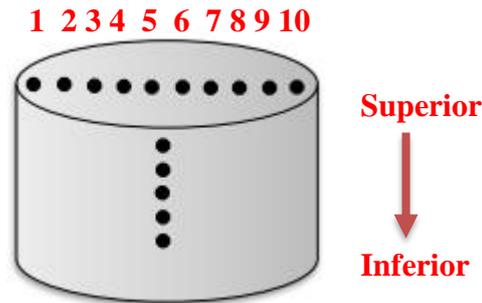


Figura 3-1 Patrón de medidas de dureza shore en probetas.

Para llevar a cabo el ensayo, se estipula un patrón a la hora de materializar las mediciones, de manera que todas las probetas son medidas el mismo número de veces y de la misma manera. Cada probeta es medida en quince ocasiones. En la base o superficie inferior se llevan a cabo 10 mediciones a lo largo del diámetro y en la cara lateral se realizan cinco medidas para comprobar si existe estratificación.

3.2.2 *Análisis termogravimétrico y de calorimetría de barrido diferencial*

En lo que se basa el proceso de análisis termogravimétrico, es en analizar la variación de masa que experimenta una muestra con el transcurso del tiempo cuando es sometida a unos determinados ciclos de temperatura, los cuales programamos nosotros. Por otro lado, la calorimetría de barrido diferencial se basa en el empleo de una técnica de análisis la cual permite medir la diferencia de calor entre una muestra y otra, considerada de referencia, en función de la temperatura. Este análisis se lleva a cabo con un equipo termogravimétrico proporcionado por el CUD, situado en el laboratorio de mecánica.

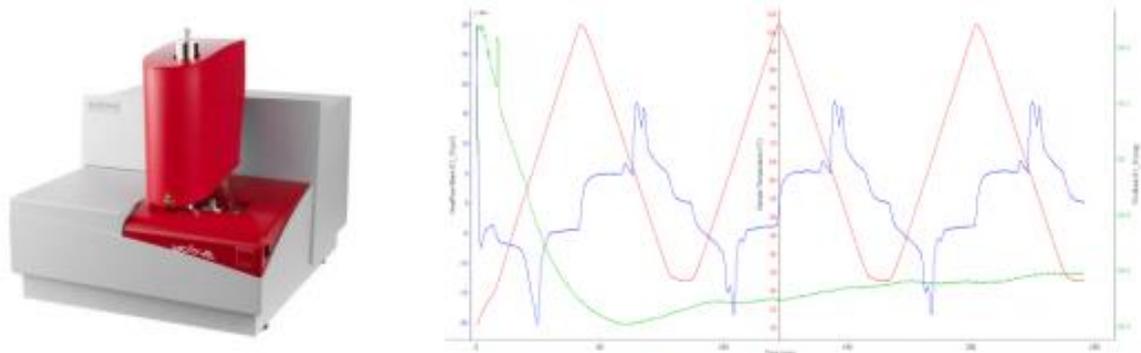


Figura 3-2 Equipo TG y análisis termogravimétrico de una muestra.

En el TG se llevan a cabo los análisis de todas las muestras que derivan de las diferentes combinaciones definidas por el diseño de Box-Behnken, de forma que analizando la cantidad de energía que son cada una de ellas capaces de almacenar, se obtendrá superficies de respuestas que permitirán optimizar la cantidad de PCM que se deberá introducir en la resina para potenciar sus propiedades.

El equipo Labsys Evo 1180 está compuesto por un horno y una balanza en los cuales se ejecutan los distintos ciclos de calentamiento y enfriamiento, previamente programados, así como un ordenador con dos softwares instalados. En el primero de ellos, es en el que se ha de programar el experimento, con sus correspondientes ciclos, temperaturas, tiempos y gradientes de temperaturas. Mientras que en el segundo es, es en el que se lleva a cabo el análisis de los datos obtenidos.

Acquisition

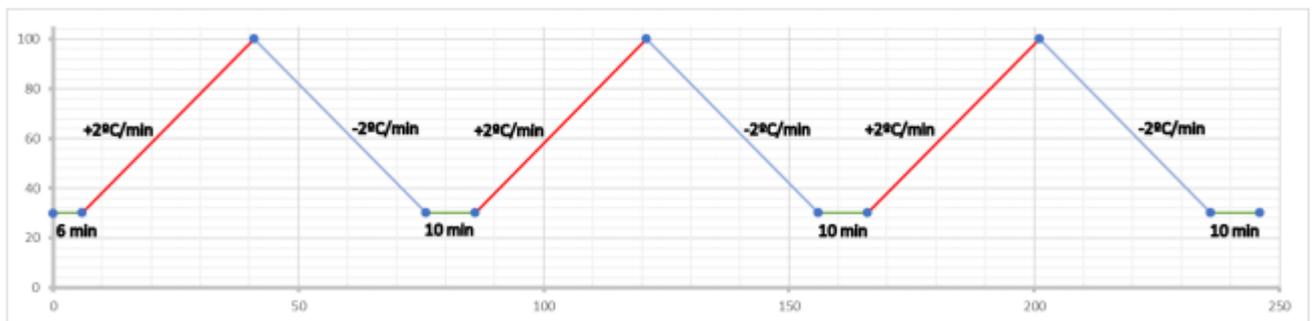
El software Acquisition es el encargado de controlar todo lo relativo al experimento. Previo al inicio del experimento, se han de diseñar y definir los ciclos de calentamiento y enfriamiento a los que se pretende someter a las distintas muestras, atendiendo al tiempo, temperaturas, velocidades de calentamiento y enfriamiento, así como a la refrigeración y gas de barrido. Una vez diseñado el experimento, encontrándose abiertos debidamente tanto el circuito de refrigeración como los gases, y con la muestra colocada apropiadamente ya en el horno, se puede iniciar el experimento y seguir de manera visual por medio de gráficas en tiempo real sus distintas fases en este software.

Processing

El software Processing es empleado para llevar a cabo el procesado y análisis de los datos térmicos que han sido obtenidos a partir de cualquiera de los instrumentos empleados, incluyendo los del software anterior. Para ello, el procedimiento consiste en cargar los datos para analizarlos, pudiendo hacerlo desde distintas perspectivas atendiendo a los requerimientos del usuario. Esto permite alcanzar conclusiones de los distintos datos obtenidos tales como entalpías, flujos de calor, temperaturas, variaciones de masa, etc.

Metodología para análisis de probetas

El análisis de probeta consiste en el estudio de las características termogravimétricas y térmicas de los distintos compuestos en el equipo. Este equipo está compuesto por una balanza y un horno que es el que somete a la muestra a un ciclo programado de cambios de temperatura, durante el cual se analiza el flujo de calor, el peso de la muestra, así como las temperaturas del horno y de la muestra. De los elementos de este equipo, y también de este trabajo, entre los más relevantes se encuentran los ciclos de cambios de temperaturas a los que las distintas muestras son sometidas. En el caso de este trabajo, se trata de un ciclo que cuenta con 3 repeticiones con el fin de apreciar cómo varían las propiedades de la muestra a lo largo del tiempo, para comprobar si el proceso es reversible o no, y para poder descartar el primero de los ciclos, ya que experimentalmente se ha podido comprobar que tiende a ser erróneo. El ciclo está compuesto por 3 tramos, uno de calentamiento en el que la temperatura del horno aumenta de 30°C a 100°C, uno de enfriamiento en el que se enfría hasta alcanzar de nuevo la temperatura de 30°C y finalmente una recta de estabilización de temperaturas a 30°C.



Gráfica 3-1 Fases de calentamiento para el análisis termogravimétrico de las muestras.

Para analizar todas las probetas que han sido elaboradas previamente, se estipula un patrón para el análisis de cada una de ellas, el cual consiste en lo siguiente:

1. Abrir siguiendo las instrucciones y delicadamente el horno del TG, para a continuación extraer el crisol de alúmina ayudándose de las pinzas.

2. Trasladar tanto el crisol como las probetas al laboratorio de química.
3. Pesar en la balanza de alta precisión el crisol vacío, y con ello tarar la báscula.
4. Realizar un corte en el canto de la superficie inferior con un cúter, para así poder cortar lascas del material sin ser de la superficie.
5. Introducir las lascas obtenidas en el paso anterior en el crisol de alúmina hasta que pese aproximadamente 12mg.
6. Trasladar el crisol con el compuesto de nuevo al laboratorio de mecánica e introducir cuidadosamente en el TG.
7. Cerrar el horno según las instrucciones y comenzar el experimento.

Una vez haya finalizado el programa de análisis de cada una de las probetas, se procede a abrir el horno, extraer haciendo uso de las pinzas el crisol con el compuesto analizado, para seguidamente proceder a la limpieza del mismo, ya que después se ha de poder emplear de nuevo sin que posibles residuos afecten a los resultados de los análisis siguientes.

El procedimiento de limpieza se realiza inicialmente con las pinzas, procurando extraer todo el material que pudiera quedar en el interior del crisol, así como residuos. Una vez se haya extraído la mayor parte del material con las pinzas, se emplea acetona para facilitar la eliminación de material restante. Pudiéndose hacer uso también de una disolución de ácido clorhídrico diluida al 10% para garantizar una completa limpieza del crisol antes de volver a ser empleado en el análisis de otra probeta.

Para concluir con la limpieza del crisol, se aclara con agua. Previamente a ser utilizado de nuevo, el crisol, se ha de someter a un ciclo rápido de secado en el cual se incrementa la temperatura hasta los 100°C con el objetivo de garantizar la evaporación del agua restante, y posteriormente se enfría rápidamente. Una vez terminado este proceso, el crisol está listo para ser utilizado nuevamente en el análisis de otra probeta.

4 RESULTADOS

4.1 Análisis de dureza

El análisis de dureza ha sido realizado tal y como viene expuesto en el apartado 3.2.1, obteniendo los siguientes resultados, para cada una de las probetas que salen del diseño Box-Behnken.

Una vez se han obtenido las 10 medidas de la dureza con el durómetro Shore D, se calcula la media aritmética de cada una de las probetas para determinar así la dureza media las mismas. También se han realizado 5 medidas en la superficie lateral de las probetas con el objetivo de valorar si se ha obtenido una mezcla homogénea de los distintos componentes o si debido a la diferencia de densidades, se ha podido producir una diferenciación de capas a lo largo de la altura de la matriz.

Medida	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	M-6	M-7	M-8	M-9
1	90	91	94	74	94	71	87	78	93
2	86	87	84	59	68	74	86	74	70
3	85	88	68	75	58	87	82	52	55
4	83	75	87	68	71	85	77	61	90
5	84	67	88	56	52	84	84	57	66
6	82	80	66	54	60	89	84	50	70
7	80	87	88	94	74	91	87	61	56
8	85	91	88	93	75	78	86	48	76
9	82	86	86	72	87	92	87	77	72
10	81	87	82	94	86	88	91	88	91

Tabla 4-1 Mediciones de dureza en la base de las probetas.

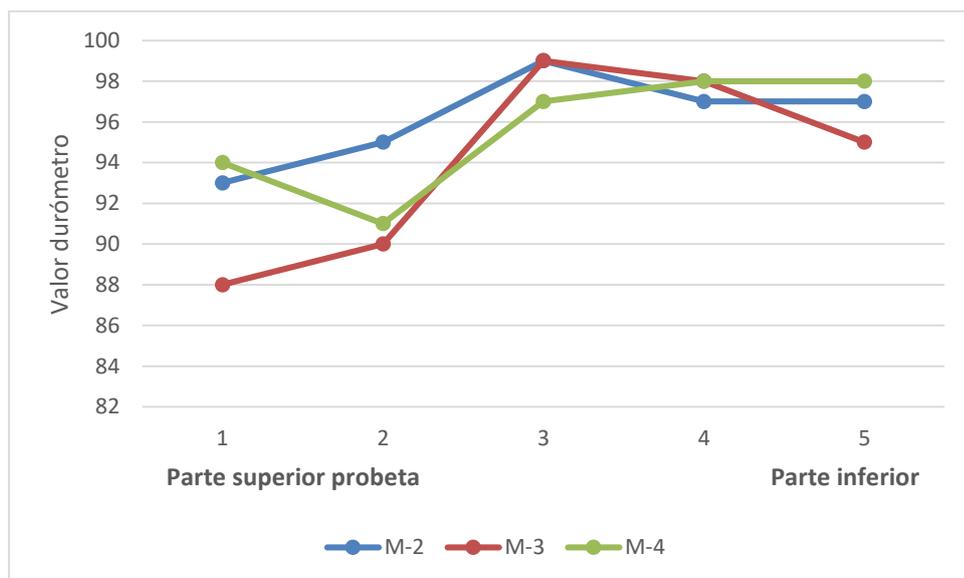
A pesar de que en la mayoría de las probetas se puede apreciar una cierta homogeneidad en las mezclas resultantes y que durante el proceso de curado de la probeta no ha cambiado su composición, se puede apreciar en tres de ellas una cierta tendencia a disminuir su dureza a medida que las medidas se toman próximas a la parte superior. Cabe destacar que a pesar de que las tres probetas presentan una dureza decreciente con la altura, esta tendencia no es muy pronunciada. Con una temperatura mayor en el proceso de curado, el tiempo de duración del mismo disminuiría, lográndose así una composición más homogénea.

M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	M-6	M-7	M-8	M-9
83.8	83.9	83.1	73.9	72.5	83.9	85.1	64.6	73.9

Tabla 4-2 Medias aritméticas de las medidas de dureza obtenidas para las probetas.

	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	M-6	M-7	M-8	M-9
SUPERIOR	99	93	88	94	97	96	92	96	94
↓	98	95	90	91	97	97	96	96	94
	99	99	99	97	98	96	96	99	62
	98	97	98	98	98	91	98	97	92
	INFERIOR	91	97	95	98	95	95	92	92

Tabla 4-3 Mediciones de dureza en la superficie lateral de las probetas.



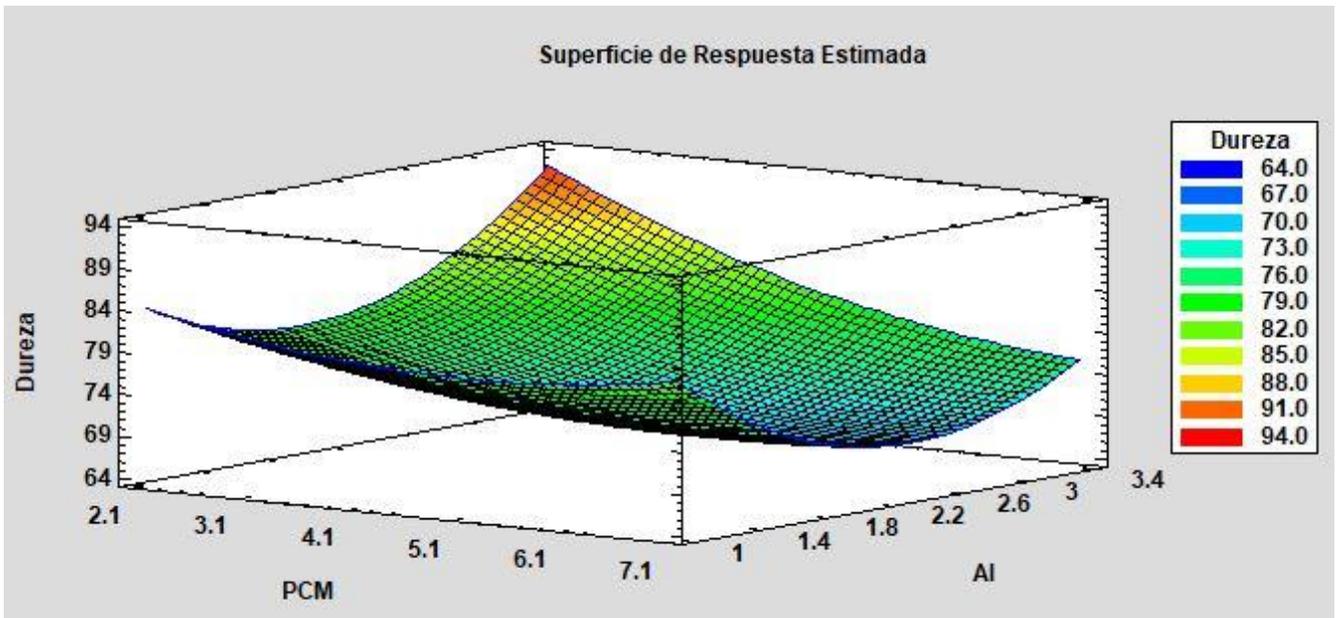
Gráfica 4-1 Dureza de las tres probetas que presentan heterogeneidad en la medida.

En el resto de las probetas realizadas no se aprecian cambios pronunciados en las tendencias de las medidas realizadas. Y el hecho de que las curvas de tendencia correspondientes a las gráficas sean prácticamente paralelas, demuestra que la mezcla del compuesto no presenta heterogeneidades a lo largo de la fase de curado.

Una vez se tienen los datos finales del ensayo de dureza, se puede generar una superficie de respuesta para visualizar de manera gráfica los resultados de la manera en que afectan cada uno de los factores a la dureza de una muestra. Este producto se genera utilizando el software STATGRAPHICS, el mismo en el que se realizó el diseño de la matriz de Box-Behnken.

Introduciendo las medias aritméticas de las medidas tomadas de cada una de las probetas y resolver el sistema, el programa genera una gráfica en la que se visualiza la superficie de respuesta. Esto permite analizar de forma intuitiva el modo en que afectan los factores a la dureza en una probeta.

De la gráfica de superficie de respuesta se puede inferir que la dureza Shore D de la probeta es directamente proporcional al porcentaje que se añade de aluminio, y menor de PCM. El programa también permite variar los factores de la gráfica anterior para ver cómo se afectan entre ellos en la respuesta.

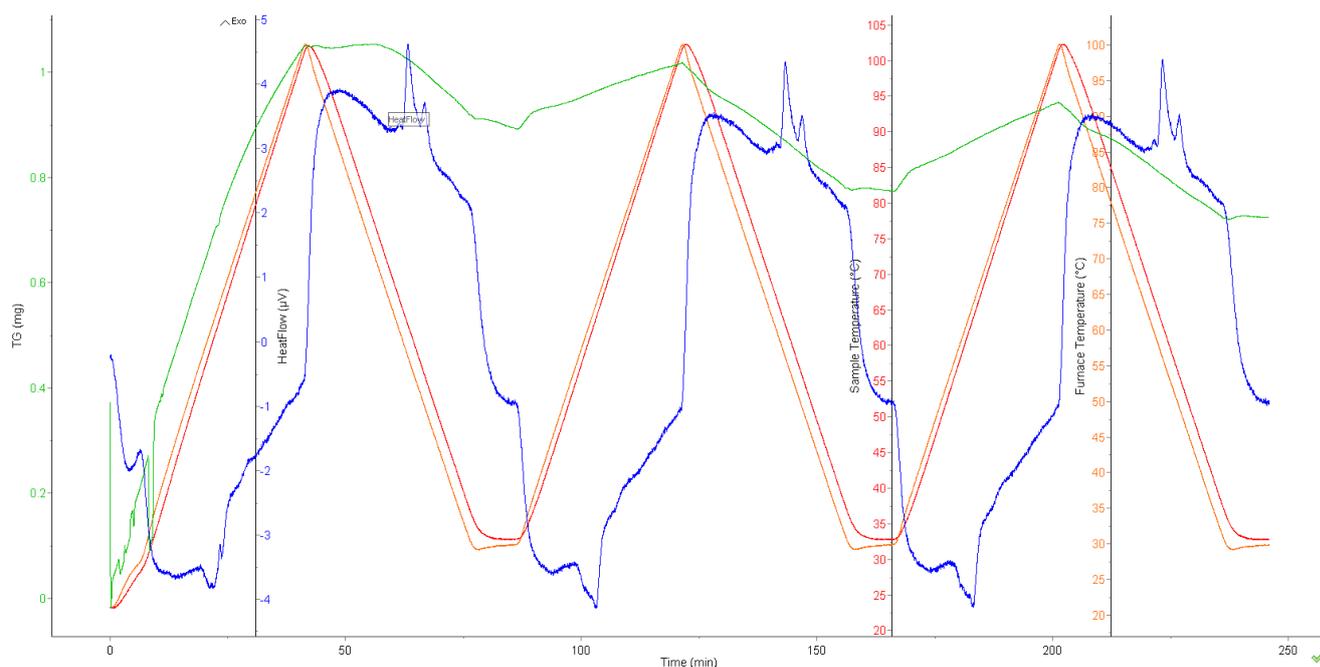


Gráfica 4-2 Superficie de respuesta correspondiente a la relación de los porcentajes de PCM y Al en peso con la dureza Shore D

4.2 Análisis en el TG-DSC

Este análisis es realizado con el fin de determinar la capacidad, del compuesto que se ha elaborado, de absorber energía calorífica para posteriormente cederla al entorno y comprobar cómo se influyen entre sí los diferentes componentes que han sido añadidos al compuesto mediante la superficie de respuesta. Para la realización de este análisis se ha de someter al crisol vacío al mismo ciclo de calentamientos a los que van a ser sometidas las muestras de las diferentes probetas, con el fin de crear un blanco que poder descontar posteriormente a los resultados obtenidos en los análisis de las muestras de las diferentes probetas. Y así poder ver el análisis del compuesto de manera precisa.

Un blanco consiste en establecer una referencia, es decir, determinar un cero a partir del cual obtener los valores estudiados, de manera que se observa el comportamiento del crisol vacío a los ciclos que hemos programado para los análisis, y así posteriormente se descuenta ese comportamiento, quedando sólo el comportamiento de las muestras a estudiar.

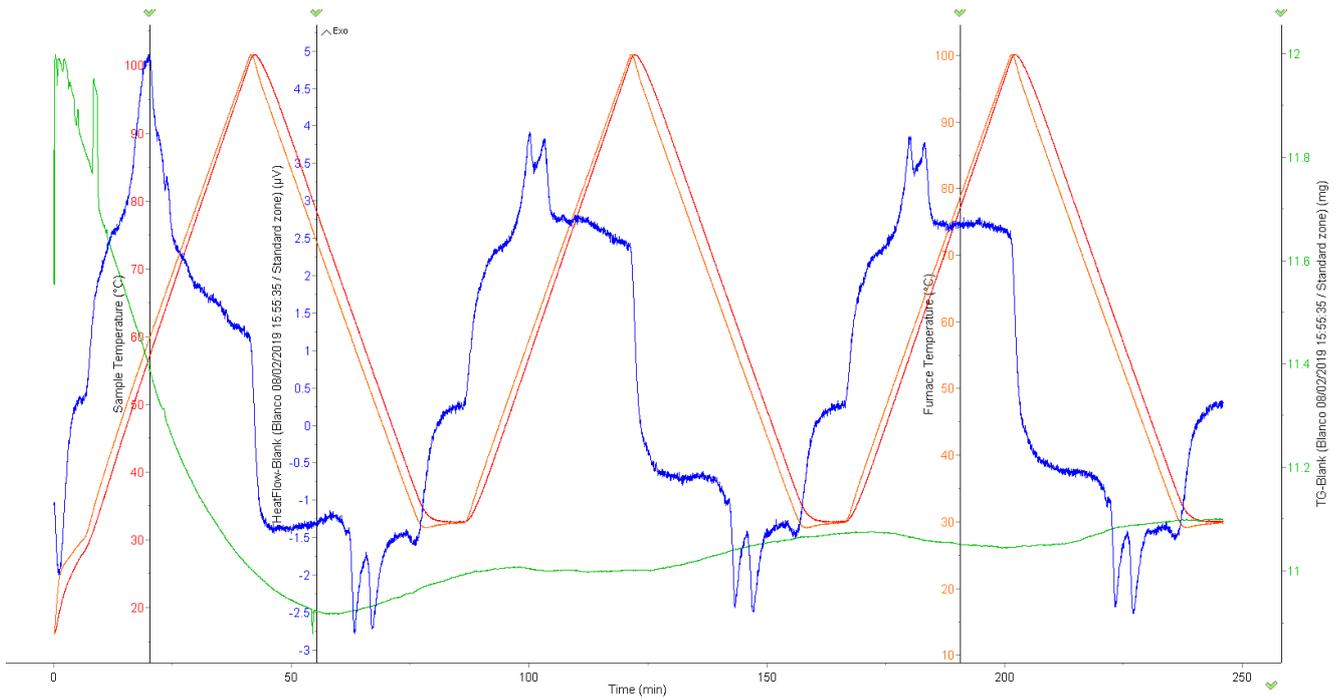


Gráfica 4-3 Gráfica del comportamiento del crisol vacío al ciclo programado para los análisis.

Esta gráfica es un ejemplo, a su vez, de las distintas curvas que se obtienen de los ensayos de TG de las diferentes muestras, las cuales derivan de la utilización del software de análisis TG “Processing”. En la Gráfica 4-4 se solapan simultáneamente 4 curvas. Para poder leer lo que representa esta gráfica e interpretarla, es necesario saber que cada una de ellas se corresponde de la siguiente manera:

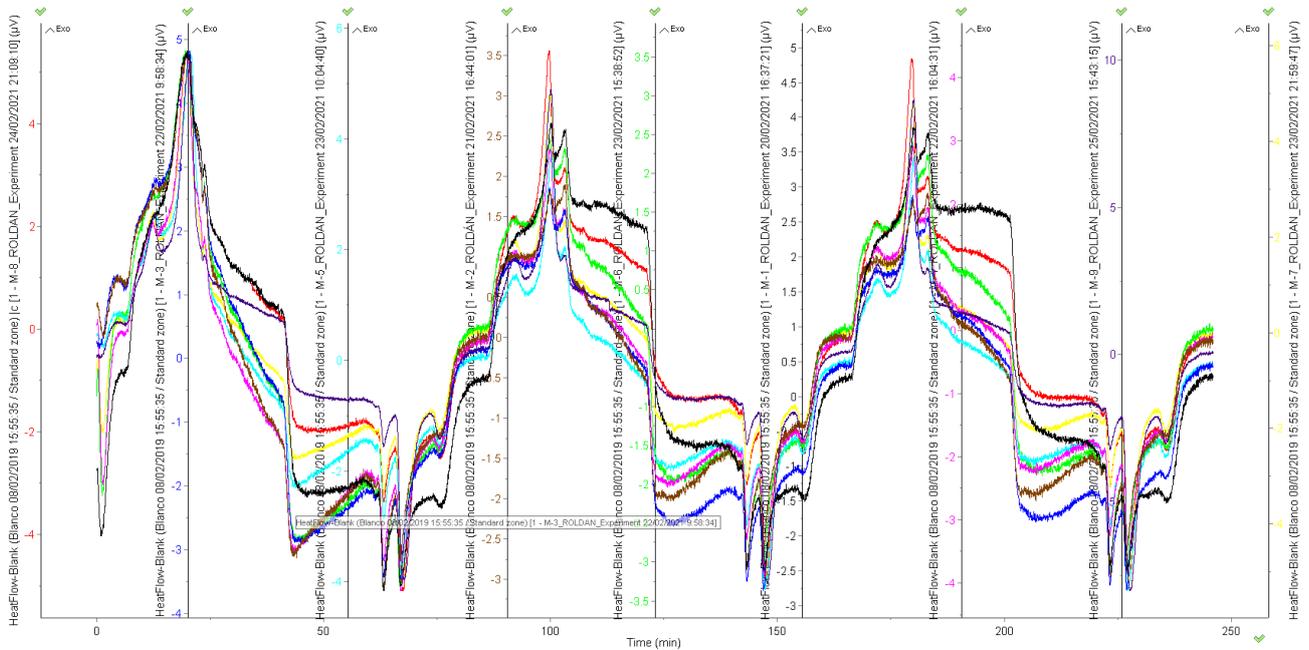
- Línea naranja: temperatura del horno.
- Línea roja: temperatura de la muestra durante el proceso, la cual se ajusta de manera precisa a la temperatura que se establece en el ciclo.
- Línea verde: variaciones de peso que experimenta la muestra a lo largo del proceso.
- Línea azul: flujo de calor en la muestra. Si tiene un valor positivo significará que se trata de un proceso exotérmico y si su valor es negativo, el proceso será endotérmico.

Este apartado engloba el estudio de los resultados obtenidos a partir de los análisis realizados a las diferentes muestras, analizando la capacidad de absorción de energía de las mismas, así como su capacidad de ceder energía y la reversibilidad del proceso. Cabe destacar que, a pesar de que el proceso completo está compuesto por tres ciclos de calentamiento de 30°C a 100°C, el primero se descarta por ser un ciclo de estabilización y sólo se tienen en cuenta los dos últimos. Se puede observar en la Gráfica 4-5 el ejemplo de un análisis, correspondiente al análisis de la muestra M-1.



Gráfica 4-4 Análisis termogravimétrico muestra probeta M-1

A continuación, se procede a explicar resumidamente los datos obtenidos a lo largo de los 9 análisis que se han llevado a cabo con las probetas. Para ello se utiliza una gráfica (Gráfica 4-6) en la que se superponen los 9 experimentos que muestra el valor del flujo de calor frente al tiempo. Las gráficas de cada uno de los experimentos se encuentran en el Anexo IX: Gráficas análisis TG.



Gráfica 4-5 Flujo de calor correspondiente a los 9 análisis TG.

Lo primero que cabe resaltar de la Gráfica 4-6 es que, en todas las muestras, las curvas de flujo de calor cortan el eje de abscisas. Lo que evidencia que se producen etapas endotérmicas y exotérmicas. Se puede observar entonces que tanto la fusión como la solidificación tienen lugar en los tres ciclos. La

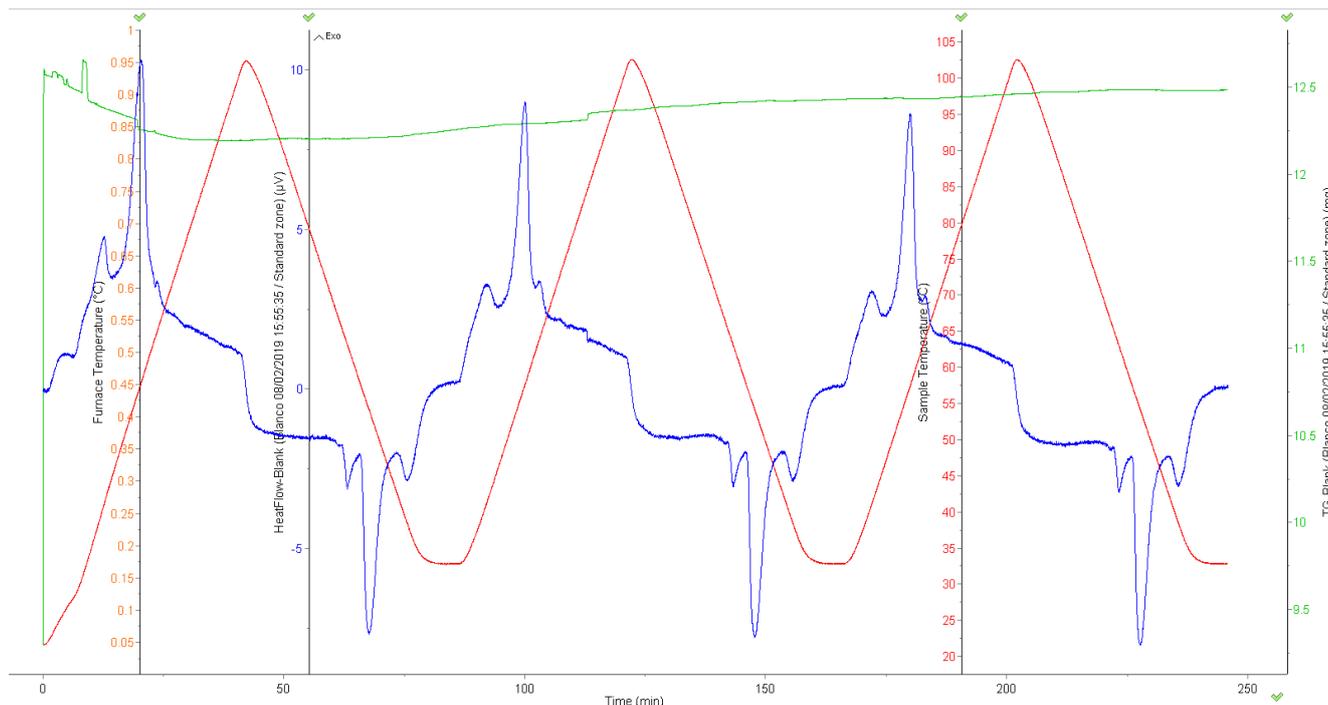
totalidad de las probetas presentan la misma forma de curva a lo largo del tiempo, debido al hecho de que las matrices están compuestas por los mismos elementos, pero en diferentes proporciones. Se aprecia que el dato que más varía es la cantidad de calor almacenado y cedido por el compuesto en función del valor que tiene el PCM en el diseño de Box-Behnken, comprobándose que los picos más acentuados corresponden a aquellos compuestos cuyo valor del material de cambio de fase en la matriz es +1, y las curvas más amortiguadas aquellas en las que el valor es 0 y -1.

En los procesos endotérmicos del PCM se aprecian dos picos que son causa del calentamiento de la resina en la muestra, mientras que los picos generados en el proceso exotérmico se corresponden al enfriamiento tanto del PCM como de la resina que conforman el compuesto, contribuyendo los dos componentes a esa forma característica de la curva de flujo de calor en los compuestos. También previo al inicio del proceso de solidificación se produce un pico característico de las parafinas, notable en todas las gráficas de los experimentos.

Otra característica reseñable de la parafina empleada es su reversibilidad, ya que podemos inferir de las gráficas de flujo de calor, comparando con las temperaturas anexadas a la memoria, que los flujos de calor en tanto en los procesos endotérmicos como en los exotérmicos de los ciclos representados (descartando el primero de ellos), son muy similares a lo largo del tiempo. Este hecho es la justificación de la afirmación de que este proceso sea considerado reversible. Además de verse que las propiedades térmicas no empeoran de manera considerable tras los ciclos.

Para el estudio de las propiedades de cada una de las probetas se sacan los siguientes datos de cada una de las gráficas:

- Rango de fusión.
- Q absorbido.
- Q cedido.
- Pico máximo de fusión.
- Pico máximo de solidificación.



Gráfica 4-6 Análisis térmico de la muestra M-9.

En la Gráfica 4-6 lo que se observa es la muestra 9, que mejores resultados ha dado en cuanto a calor absorbido con diferencia, sin ser la que mayor cantidad de PCM implementaba en su composición. Se aprecian de manera marcada los procesos endotérmicos y exotérmicos.

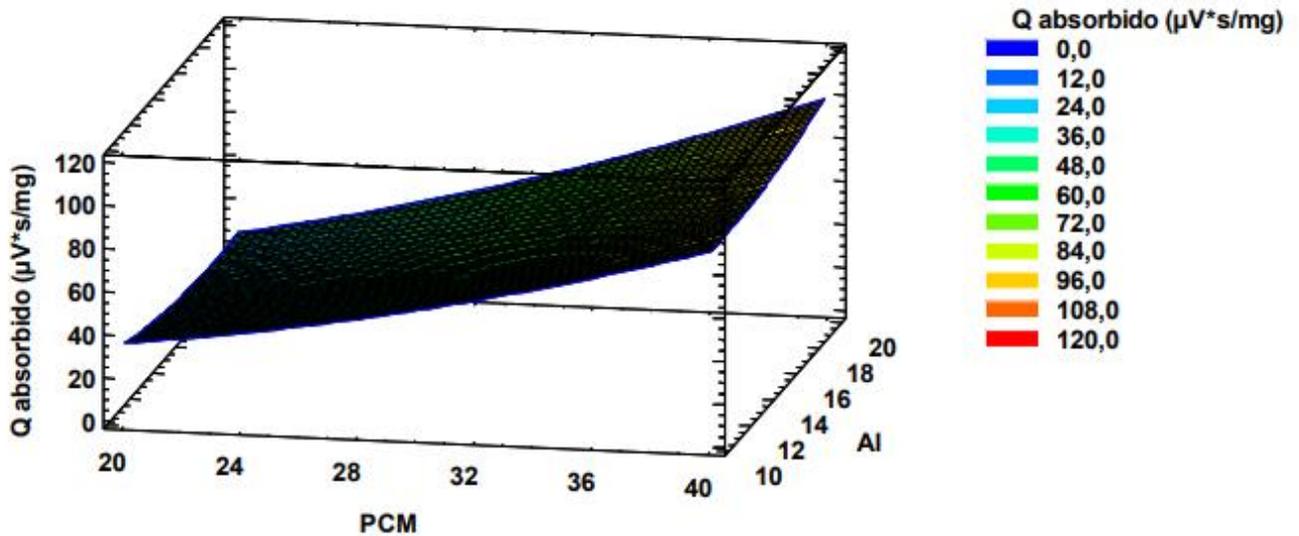
Esta muestra cuenta en el diseño de Box-Behnken con un 0 (valor intermedio) de PCM, y un 1 (valor alto) de polvo de aluminio. De lo que se deduce que el polvo de aluminio efectivamente mejora la conductividad de la matriz logrando un mayor aprovechamiento del PCM integrado, y con ello ser más eficiente.

Una vez sacados todos los datos con el software "Processing" (Tabla 4-4), se introducen en el programa "Statgraphics" para poder determinar la superficie de respuesta en función de los factores y el diagrama de Pareto para ver que factor es el más decisivo en cuanto a almacenamiento térmico.

		M-1	M-2	M-3	M-4	M-5
Rango de fusión	Inicial	57,00°C	56,76°C	56,55°C	50,54°C	47,47°C
	Final	63,40°C	63,36°C	63,75°C	60,22°C	62,29°C
Q abs 1 (µV*s/mg)		3,881	2,289	3,614	11,149	24,446
Q abs 2 (µV*s/mg)		3,881	2,776	3,539	11,417	22,171
Q ced 1 (µV*s/mg)		11,633	9,106	9,379	69,814	36,213
Q ced 2 (µV*s/mg)		11,735	9,534	9,921	71,799	44,571
Pico máximo	Fusión	58,02°C	57,98°C	58,11°C	58,12°C	58,22°C
	Solidificación	57,67°C	58,06°C	57,30°C	53,90°C	53,95°C
Q abs medio (µV*s/mg)		3,881	2,533	3,577	11,283	23,309
Q ced medio (µV*s/mg)		11,684	9,320	9,650	70,807	40,392
		M-6	M-7	M-8	M-9	
Rango de fusión	Inicial	48,65°C	45,86°C	51,18°C	47,77°C	
	Final	67,65°C	67,21°C	60,47°C	61,84°C	
Q abs 1 (µV*s/mg)		25,988	58,333	24,238	67,574	
Q abs 2 (µV*s/mg)		27,407	55,973	25,390	68,786	
Q ced 1 (µV*s/mg)		23,091	50,012	30,563	84,470	
Q ced 2 (µV*s/mg)		23,596	53,410	39,469	86,426	
Pico máximo	Fusión	58,10°C	57,67°C	56,33°C	57,89°C	
	Solidificación	53,46°C	52,69°C	51,38°C	52,91°C	
Q abs medio (µV*s/mg)		26,698	57,153	24,814	68,180	
Q ced medio (µV*s/mg)		23,344	51,711	35,016	85,448	

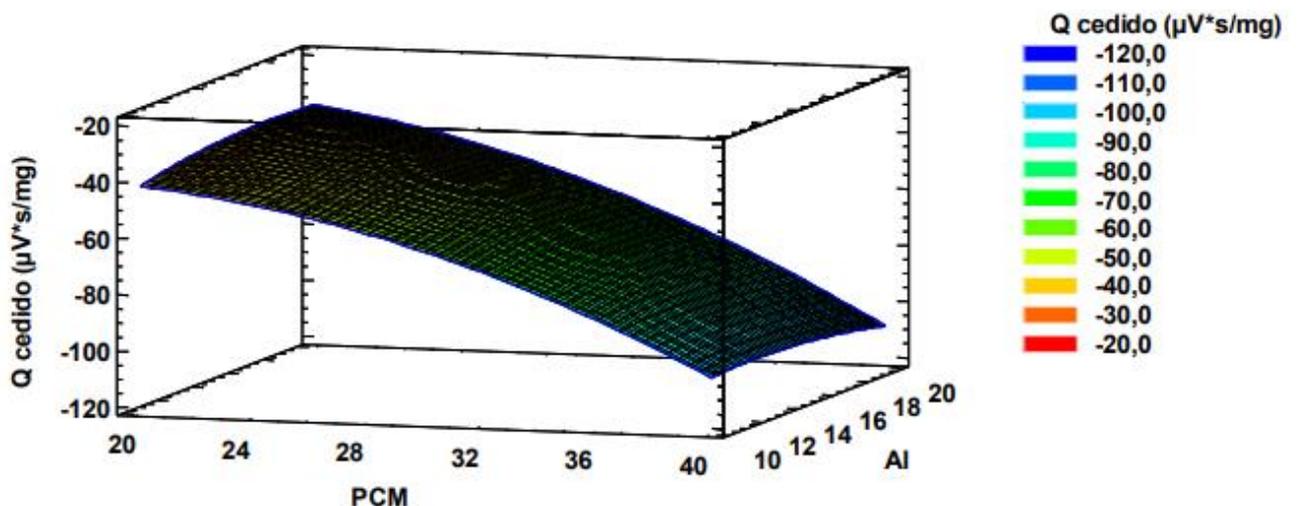
Tabla 4-4 Datos obtenidos con el software "Processing"

Para la superficie de respuesta del Box-Behnken, sólo se ha tenido en cuenta la media de los calores absorbidos y cedidos por las muestras analizadas. Para el resto de los datos cabe destacar que el punto de fusión de todas las muestras se ajusta a la que el proveedor menciona en la ficha técnica de la cera de candelilla. Dicho punto de fusión se encuentra en todos los casos dentro del rango de temperaturas que proporciona el proveedor.



Gráfica 4-7 Superficie de respuesta de calor absorbido

Como es lógico, en términos de calor absorbido (Gráfica 4-6), a mayor cantidad de material de cambio de fase en la probeta, mayor capacidad de calor absorbido. En cuanto al aluminio, tiene impacto cuando el porcentaje de PCM aumenta, ya que, al añadir el material de cambio de fase, el compuesto empeora de manera considerable su conductividad térmica y por dicha razón al añadir el aluminio se mejora el almacenamiento ya que se conduce mejor el calor por la muestra.



Gráfica 4-8 Superficie de respuesta de calor cedido

En lo relativo a la cesión de calor cuando se está enfriando la probeta, se observa en la Gráfica 4-7 que a mayor cantidad de PCM, más calor se cede al entorno, ya que en el cambio de fase de sólido a líquido ha sido capaz de almacenar más energía. En la superficie de respuesta no se aprecian más efectos que los nombrados anteriormente para la superficie de respuesta de absorción de calor.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

En este apartado de la memoria se recogen las conclusiones obtenidas lo largo de todos los análisis que han sido realizados durante el desarrollo del trabajo, los cuales han ido encaminados a demostrar la efectividad del empleo de materiales de cambio de fase en edificación, de cara a optimizar la eficiencia energética de las construcciones.

Tal y como se indica al inicio del presente documento, la pregunta que este trabajo debía responder a la finalización del mismo, es si es viable o no el empleo de PCM en materiales de construcción, así como medir en qué grado sería eficaz y eficiente. Habiendo realizado análisis de dureza y térmicos, la respuesta a esta pregunta es afirmativa. La resina epoxi se trata de un material adecuado para albergar materiales de cambio de fase en su seno. Y, como queda reflejado en otros estudios referenciados, es posible añadir este tipo de compuestos a elementos básicos de construcción, en los cuales la adición de estos compuestos no supone alteraciones significativas en sus propiedades, así como también cabe destacar la facilidad de implementar estos compuestos.

Existen una serie de puntualizaciones que cabe reseñar, las cuales se relacionan a continuación:

- La dureza del compuesto depende tanto de la resina como del material de cambio de fase que se implemente. En este trabajo se ha estudiado una resina flexible, que no se caracteriza por tener una alta dureza Shore D. Por ello, se observó que, cuanto mayor es el porcentaje en masa del PCM, la dureza de la probeta aumenta. Con la carga metálica ocurre algo parecido. Así, en la superficie de respuesta de la dureza Shore D, se observó cómo al incrementar la cantidad de aluminio aumenta la dureza, para valores +1 en PCM. Por tanto, se deduce que el aluminio no solo ayuda a contrarrestar la disminución de propiedades térmicas en la resina, sino que también mejora su dureza.

- La densidad de los aditivos puede afectar a la homogeneidad del compuesto generado. Así, materiales con una alta densidad, como el polvo de aluminio, tienden a decantar (en mayor medida cuanto mayor es el tiempo de curado). Lo tanto, es muy importante el tiempo y temperatura de curado del material.

- La conductividad térmica de las resinas epoxi estudiadas disminuye cuando se le introducen aditivos del tipo de un material de cambio de fase.

- Del estudio térmico de las probetas a partir del diseño Box-Behnken, se puede inferir que el factor más determinante para la variable cantidad de calor almacenado es el PCM. Además, de este análisis también se pudo comprobar el comportamiento reversible de todas las probetas.

De la realización de este estudio, se puede extraer que las propiedades de almacenamiento térmico de la resina epoxi flexible analizada se ven extensamente mejoradas al ser combinada con PCM y carga metálica; sin embargo, sus propiedades mecánicas se ven afectadas. No obstante, la resina epoxi es una solución óptima para actuar de contenedor de PCM abaratando los costes en comparación a los comerciales PCM micro o macro-encapsulados. Se puede observar entonces que las proporciones óptimas de los compuestos varían en función de la aplicación que se le quiera dar.

Finalmente, se concluye con que los materiales de cambio de fase tienen gran cantidad de potenciales aplicaciones, y que hoy en día solo se han desarrollado una pequeña parte. Por ello, existe gran cantidad de líneas de investigación con estos materiales que tienen como objeto final la maximización del ahorro, la minimización del gasto y de las emisiones nocivas para el medio ambiente y especialmente en el campo en el que se focaliza este trabajo, en la edificación.

5.1 Líneas futuras.

Viendo la utilidad que presentan estos compuestos en el campo de la edificación, y tratando de implementar estos resultados en el ámbito militar, y más concretamente en el de Infantería de Marina, a continuación, se relacionan algunos ejemplos en los que podría ser interesante estudiar la viabilidad, rentabilidad y eficacia real del empleo de estos compuestos:

1. Incorporación de estos compuestos en vehículos

Con el fin de reducir la firma IR de vehículos o carros de combate mediante el empleo de este tipo de recubrimientos. Muchas de las amenazas de hoy en día son misiles, bombas o municiones que cuentan con guiado infrarrojo. Cuando estos misiles detectan un foco de calor, se dirigen hacia ellos sin poder ser perturbados y sin que la unidad se percate de que un arma se dirige hacia ellos. Estos compuestos podrían ser útiles para recubrir las zonas que desprenden más calor en los vehículos, tales como motores, tubos de escape, recubrimiento de radares o las paredes interiores de los compartimentos que dan al exterior, con el objetivo de disminuir la radiación infrarroja.

En estos ejemplos, la flexibilidad de los materiales es menos importante y se podrían realizar compuestos que fueran más vulnerables a flexiones ya que la resistencia se la ofrecerá la pared que se recubre. El objetivo sería entonces maximizar el calor almacenado por lo que se podrían poner altos porcentajes de PCM. Al tener grandes valores de PCM sería necesario también agregar al compuesto un alto porcentaje de aluminio en polvo para que la conducción de calor sea rápida.

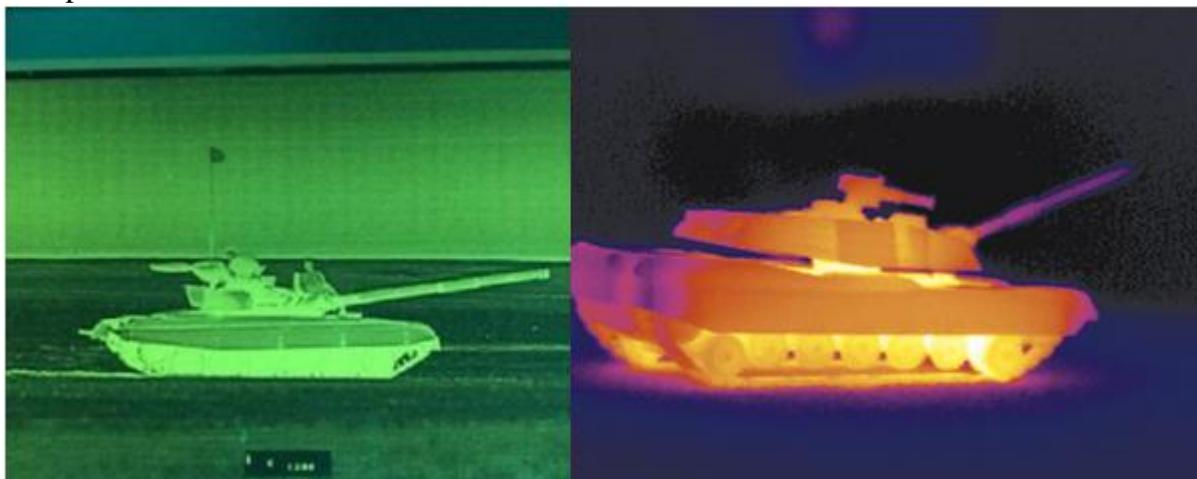


Figura 5-1 Firma térmica de un carro de combate.

2. Impregnación de resinas epoxi con PCM en textiles y equipos de protección

Actualmente es posible encontrar en el mercado tejidos utilizados en la industria textil que implementan materiales de cambio de fase con el objetivo de minimizar los cambios de temperatura en el cuerpo humano al ser sometido a temperaturas extremas, así como para favorecer la cesión de calor hacia el exterior cuando una persona realiza grandes esfuerzos y su temperatura corporal aumenta.

Con la resina epoxi flexible y PCM es posible conseguir un compuesto que permita ser impregnado en tejidos porosos con el fin de abaratar los costes. De esta manera dependiendo del material de cambio de fase que se le introduzca al compuesto, se pueden obtener los mismos objetivos.

En el ámbito militar, esta aplicación puede ofrecer un gran abanico de posibilidades tales como la impregnación de uniformes utilizados por las tropas de Infantería de Marina o del Ejército de Tierra con el objetivo de reducir su firma infrarroja en operaciones, ofreciendo así un camuflaje frente a las nuevas tecnologías de detección., resultando en una ventaja táctica.

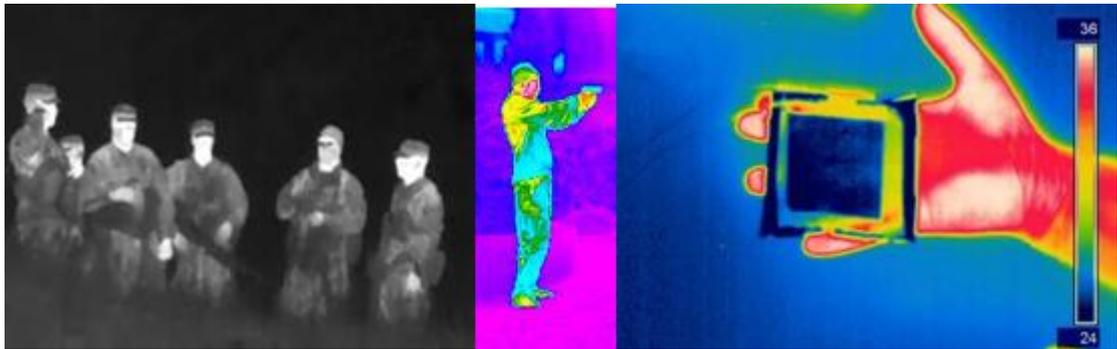


Figura 5-2 Firma térmica calor humano.

Este tipo de textiles impregnados no son sólo interesantes en el ámbito táctico, sino que también se pueden desarrollar equipos de protección individual utilizados en los buques y unidades de la Armada Española para resolver incidencias de seguridad interior. De este modo, el personal encargado de solventar incidencias en las que se dan condiciones de fuego y altas temperaturas, se verá reducida la sensación térmica a la que está sometido, evitando excesos de temperaturas en el cuerpo de los operarios.



Figura 5-3 Operario solventando incidencia con fuego.

Para el caso de esta aplicación, lo que resulta interesante es que el compuesto se trate de un material elástico ya que va a ser sometido a constantes esfuerzos de todo tipo. Por ello, si se desea impregnar un textil con este compuesto, convendría implementar porcentajes de PCM

reducidos para evitar que cuando el tejido se flexione se fracture y se produzcan pérdidas de PCM.

Se requerirá que el compuesto cuente con polvo de aluminio para mejorar la conductividad térmica del material y no conviene introducir grandes cantidades de espesante para que la tensión de fluencia sea lo más alta posible.

A raíz de este trabajo y habiendo podido comprobar que las resinas epoxi flexibles se tratan de un compuesto óptimo para albergar el material de cambio de fase, también surgen otras vías de investigación como las que a continuación se relacionan:

- El desarrollo de este trabajo se ha centrado en estudiar la viabilidad y eficacia de la implementación de un material de cambio de fase a materiales y elementos utilizados en la edificación. Sería de gran interés estudiar cómo cambian los resultados variando el PCM, o incluso pudiendo hacer mezclas de varios PCM con el fin de tener varias etapas de regulación del flujo de calor a distintas temperaturas. Así como someter a más pruebas de resistencia a elementos de construcción que implementen estos compuestos.
- Tal y como se ha explicado en las posibles aplicaciones, a día de hoy se pueden encontrar ya numerosos tejidos que almacenan PCM. Atendiendo a los despliegues de tropas que existen hoy en día, sería interesante experimentar la impregnación de estos compuestos en tejidos y estudiar en qué medida se disminuyen las emisiones infrarrojas, reduciendo así la posibilidad de ser detectados, así como reducir el efecto de altas temperaturas en zonas de operaciones como pueden ser países de Oriente Medio o Centroáfrica, en los cuales se encuentran tropas desplegadas actualmente.
- Teniendo en cuenta el ambiente en el que se desarrollan las actividades de la Armada Española, convendría realizar un estudio sobre cómo se ven afectados estos compuestos ante los agentes corrosivos del ambiente marino.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. M. M. Llana, Estudio del curado de materiales compuestos por un sistema epoxi y partículas elastoméricas.
- [2] M. Á. Á. Feijoo, Estudio experimental del comportamiento térmico de distintos tipos de paneles de hormigón empleados en la construcción, 2015.
- [3] E. Álvarez Pelegry y C. Mosácula Atienza, Implicaciones de la normativa energética y potencial de ahorro en rehabilitación, Cuadernos Orkestra, 2013.
- [4] R. García Rodríguez, Experiencia real de edificios "cero emisiones". Auditoria Acciona, 2018.
- [5] A. d. e. d. E. Energica, «Consumos, medidas y potenciales en ahorros en edificios,» 2014.
- [6] P. E. y. C. d. l. U. Europea, Directiva 2002/91/CE del Parlamento Europeo y del Consejo relativa a la eficiencia energética de edificios, Diario oficial de las Comunidades Europeas, 2002.
- [7] A. Joanna Marszal y P. Heiselberg, Zero Energy Building definition, 2010.
- [8] A. d. Graciaa y L. F. Cabeza, Phase change materials and thermal energy storage for buildings, 2015.
- [9] A. Oliver, F. Neila y A. García-Santos, Clasificación y selección de materiales de cambio de fase según sus características para su aplicación en sistemas de almacenamiento de energía térmica, 2010.
- [10] P. Arce, C. Castellón, A. Castell y L. F. Cabeza, Use of microencapsulated PCM in buildings and the effect of adding awnings, ELSEVIER, 2011.
- [11] M. P. Cano, Aislantes térmicos, criterios de selección por requisitos energéticos, 2017.
- [12] G. C. B. Morales, Temperaturas de confort e implicaciones energéticas en viviendas climatizadas mecánicamente, 2014.
- [13] M. V. Rodríguez, Materiales aislantes sostenibles, 2015. IGNACIO NAVARRETE PARDO 48
- [14] S. M. hasnain, Review on sustainable thermal energy storage technologies, 1997.
- [15] E. R. Ubiñas, Almacenamiento de energía térmica por calor latente en los edificios., 2015.
- [16] E. y. S. S. Ministerio de Trabajo, Resinas epoxi, 2017.
- [17] j. Fan-Long, L. Xiang y P. Soo-Jin, Synthesis and application of epoxy resins: A review, ELSEVIER, 2015.

- [19] M. J. G. Fernández, Caracterización termofísica y mecánica de un recubrimiento epoxi con efecto de barrera térmica, 2018.
- [20] M. M. Farid, A. M. Khudhair y S. A. K. Razack, A review on phase change energy storage: materials, 2003.
- [22] S. Ferreira, R. Bruns, H. Ferreira, G. Matos, J. Davida, G. Brandao, E. d. Silva, L. Portugal, P. d. Reisc, A. Souza y W. d. Santos, Box-Behnken design: An alternative for the optimization of analytical methods, ELSEVIER, 2007.
- [23] J. P. S.L, «Análisis termográfico, herramienta de mantenimiento predictivo».
- [24] P. IRM, «Flir i7».
- [25] D. S. Abraira, Nuevas redes termoestables a partir de una resina epoxi modificada, 2010.
- [26] V. A. Z. Vargas, Nuevas redes termoestables a partir de una resina epoxi modificada, 2013.
- [27] W. G. Anderson, P. Ritt, C. Tarau y a. J. Weyant, Applications for Phase Change Material (PCM) Heat Sinks, 2016.
- [28] A. O. Ramírez, Integración de materiales de cambio de fase en placas de yeso reforzadas con fibras de polipropileno, 2009.
- [29] A. Castell, I. Martorell, M. Medrano, G. Pérez y L. Cabeza, Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling, 2009.
- [30] S. A. Memon, Phase change materials integrated in building walls: A state of the art review, 2013.
- [30] C. Mijangos y J. Moya, Nuevos materiales en la sociedad del siglo XXI, CSIC, 2005.
- [31] AVEN, «PLAN DE AHORRO Y EFICIENCIA ENERGÉTICA,» Agencia valenciana de la energía.
- [32] S. Osorio, «Almacenamiento energético,» de Energética internacional, 2013, p. 33.
- [33] W. Callister, Ciencia e ingeniería de los materiales, Reverté, 2007.
- [34] A. Fleischer, Thermal Energy Storage Using Phase Change Materials, Springer, 2015.
- [35] D. Juárez, R. Balart, S. Ferrándiz y D. García, «ESTUDIO DE MATERIALES CON CAMBIO DE FASE Y ANÁLISIS SEM DE MICRO (PCM),» 3c Tecnología, p. 25, 2012.
- [36] NASIMBA y V. P. PACHACAMA, DISEÑO, CARACTERIZACIÓN Y APLICACIÓN DE UN MATERIAL COMPUESTO CON BASE DE RESINA EPOXI, Ecuador, 2015.
- [37] S. Raoux y M. Wuthing, Phase Change Material. Science and applications, Springer, 2008.
- [38] A. Oliver Ramírez, INTEGRACIÓN DE MATERIALES DE CAMBIO DE FASE EN PLACAS DE YESO REFORZADAS CON FIBRAS DE POLIPROPENO, Universidad CARACTERIZACIÓN TERMOFÍSICA Y MECÁNICA DE UN RECUBRIMIENTO EPOXI CON EFECTO DE BARRERA TÉRMICA 109 Politécnica de Madrid: Madrid, 2009.
- [39] M. Á. Álvarez Feijoo, ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE DISTINTOS TIPOS DE PANELES DE HORMIGÓN EMPLEADOS EN LA CONSTRUCCIÓN, Vigo, 2015.
- [40] J. Kosny, PCM-Enhanced Building Components. An Application of Phase Change Materials in Building Envelopes and Internal Structures., Springer, 2015.
- [41] T. Steven y L. Cabeza, High-Temperature Thermal Storage Systems Using Phase Change Materials, Academic Press, 2017.

- [42] Oliver y A. García Santos, Clasificación y selección de materiales de cambio de fase según sus características para su aplicación en sistemas de almacenamiento de energía térmica, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2012.
- [43] B. Ellis, Chemistry and Technology of Epoxy Resins, Springer, 1993.
- [44] A. Freddy Leonard, El reciclaje de polímeros, alternativa para la síntesis de resinas epóxicas en la industria, 2009.
- [45] M. Domínguez y C. García, Aprovechamiento de los Materiales de Cambio de Fase en la climatización, 2009.
- [46] A. Navarra Sáez y J. Blanco Tirado, «El programa BAM, reducciones firmas magnéticas y acústicas.,» Revista Armada Española, p. 8, 2011. CARACTERIZACIÓN TERMOFÍSICA Y MECÁNICA DE UN RECUBRIMIENTO EPOXI CON EFECTO DE BARRERA TÉRMICA 111
- [47] H.G. Barkmann, F.C. Wessling, Use of buildings structural components for thermal storage, Proceedings of the Workshop on Solar Energy Storage Subsystems for the Heating and Cooling of Buildings, Charlottesville (Virginia, USA), 1975.
- [48] I.O. Salyer, A.K. Sircar, Phase change materials for heating and cooling of residential buildings and other applications, Proceedings of the 25th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference—IECEC_90, 1990.
- [49] S. Campos Maya. Incorporación de PCM en elementos constructivos para la mejora energética. (2010)

ANEXO I: EJEMPLOS DE SUSTANCIAS Y MEZCLAS QUE SE UTILIZAN COMO MATERIALES PCM.

Sustancias inorgánicas

Componentes	Temperatura fusión (°C)	Calor de fusión (kJ/kg)	Conductividad térmica (W/mK)	Densidad (kg/m ³)
H₂O	0	333,0	0,612	998 líquido 917 sólido
LiClO₃ _ 3H₂O	8,1	253,0	-	1.720
CaCl₂ _ 6H₂O	29	190,8	0,540 líquido 1,088 sólido	1.562 líquido 1.802 sólido
Na₂SO₄ _ 10H₂O	32,4	254,0	0,544	1.485
Na₂CO₃ _ 10H₂O	32-36	246,5	-	1.442
Na₂HPO₄ _ 12H₂O	35,5	265,0	-	1.522
Na₂S₂O₃ _ 5H₂O	48	201,0	-	1.600 sólido 1.666 líquido
Mg(NO₃)₂ _ 6H₂O	89	162,8	0,490 líquido 0,502 sólido	1.550 líquido 1.636 sólido
Na₂CO₃	854	275,7	2	2.533
KF	857	452,0	-	2.370
K₂CO₃	897	235,8	2	2.290

Fuente: B. Zalba, J.M Marín, L.F Cabeza, H. Mehling. Review on termal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. 2002

Sustancias orgánicas

Componentes	Temperatura fusión (°C)	Calor de fusión (kJ/kg)	Conductividad térmica (W/mK)	Densidad (kg/m³)
Parafina C14	4,5	165	-	-
Parafina C15-C16	8	153	-	-
Polyglycol E400	8	99,6	0,187	1.125 líquido 1.228 sólido
Parafina C16-C18	20-22	152	-	-
Polyglycol E600	22	127,2	0,189	1.126 líquido 1.232 sólido
Parafina C13-C24	22-24	189	0,210	0,760 líquido 0,900 sólido
1-Dodecanol	26	200	-	-
Parafina C18	28	244	0,148 líquido 0,150 sólido	0,774 líquido 0,814 sólido
1-Tetradecanol	38	205	-	-
Parafina C16-C28	42-44	189	0,21 sólido	0,765 líquido 0,910 sólido
Parafina C20-C33	48-50	189	0,21 sólido	0,769 líquido 0,912 sólido
Parafina C22-C45	58-60	189	0,21 sólido	0,795 líquido 0,920 sólido
Polyglycol E6000	66	190,0	-	1.085 líquido 1.212 sólido
Parafina C21-C50	66-68	189	0,21 sólido	0,830 líquido 0,930 sólido
Biphenyl	71	119,2	-	991 líquido 1.166 sólido
Propionamide	79	168,2	-	-
Naphthalene	80	147,7	0,132 líquido 0,340 sólido	976 líquido 1.145 sólido
Erythritol	118	339,8	0,326 líquido 0,733 sólido	1.300 líquido 1.480 sólido

Fuente: B. Zalba, J.M Marín, L.F Cabeza, H. Mehling. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. 2002

Mezclas no eutécticas de sustancias orgánicas. Ácidos grasos.

Componentes	Temperatura fusión (°C)	Calor de fusión (kJ/kg)	Conductividad térmica (W/mK)	Densidad (kg/m³)
Propyl palmiate	10	186	-	-
Isopropyl palmiate	11	95-100	-	-
Isopropyl stearate	14-18	140-142	-	-
Caprylic acid	16	148,5	0,149	901 líquido 981 sólido
Butyl stearate	19	140	-	-
Capric-lauric acid	21	143	-	-
Vinyl stearate	27-29	122	-	-
Capric acid	32	152,7	0,153	878 líquido 1.004 sólido
Methyl-12 hydroxy-stearate	42-43	120-126	-	-
Lauric acid	42-44	178	0,147	870 líquido 1.007 sólido
Myristic acid	49-51	204,5	-	861 líquido 990 sólido
Palmitic acid	64	185,4	0,162	850 líquido 989 sólido

Fuente: B. Zalba, J.M Marín, L.F Cabeza, H. Mehling. Review on termal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. 2002

ANEXO II: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DE PCM QUE SE COMERCIALIZAN EN EL MERCADO ACTUALMENTE.

PARAFINAS DE CALOR LATENTE SIN ENCAPSULADO												
RUBITHERM	Punto de fusión (°C)	Zona de fusión (°C)	Zona de congelamiento (°C)	Capacidad almacenamiento de calor. Rango 15-30°C. (kJ/kg)	Densidad sólido a 15°C. (kg/l)	Densidad líquido a 25°C. (kg/l)	Volumen de expansión en el rango de cambio de fase. (%)	Conductividad térmica. W/(m*K)	Viscosidad a 50°C. (mm ² /s)	Punto de inflamación: PCM. (°C)	Corrosión	Amenaza para el agua
RT 21	21	18-23. Típico es: 21°C	22-19. Típico es 22°C	134	0.88	0.77	14	0.2	25.71	154	Químicament e inerte con la mayoría de los materiales.	Clase de peligro 1 (WGK)
RT 27	27	25-28. Típico es: 27°C	28-25. Típico es 27°C	184	0.88	0.76	16	0.2	26.32	164	Químicament e inerte con la mayoría de los materiales.	Clase de peligro 1 (WGK)
RT 31	29	27-31. Típico es: 29°C	31-27. Típico es 29°C	169	0.88	0.76	16	0.2	28.57	174	Químicament e inerte con la mayoría de los materiales.	Clase de peligro 1 (WGK)
RT 42	41	38-43. Típico es: 41°C	43-37. Típico es 42°C	174	0.88	0.76	16	0.2	30.93	>100	Químicament e inerte con la mayoría de los materiales.	Clase de peligro 1 (WGK)
RT 50	49	45-51. Típico es: 49°C	51-46. Típico es 50°C	168	0.88	0.76	16	0.2	31.20	>100	Químicament e inerte con la mayoría de los materiales.	Clase de peligro 1 (WGK)

Tabla A0-1 Características de PCM comercializados actualmente. Fuente rubitherm.com

PARAFINAS DE CALOR LATENTE ENCAPSULADAS										
BASF	Punto de fusión (°C)	Rango de aplicación (°C)	Capacidad almacenamiento de calor. (kJ/kg)	Capacidad de calor latente (kJ/kg)	Tipo de producto	Densidad (kg/m ³)	Densidad aparente (kg/m ³)	Viscosidad (mPas)	Estabilidad de volumen. (%)	Durabilidad
DS 5001	26	10-30	145	110	Polvo	-	2.5-3.5	-	Encapsulado	>10.000 ciclos
DS 5008	23	10-30	135	100	Polvo	-	2.5-3.5	-	Encapsulado	>10.000 ciclos
DS 5029	21	10-30	125	90	Polvo	-	2.5-3.5	-	Encapsulado	>10.000 ciclos

Tabla A0-2 Características parafinas de calor latente ecapsuladas. Fuente micronal.de

SALES HIDRATADAS SIN ENCAPSULADO												
RUBITHERM	Punto de fusión (°C)	Zona de fusión (°C)	Zona de congelamiento (°C)	Capacidad almacenamiento de calor. (kJ/kg)	Densidad sólido a 15°C. (kg/l)	Densidad líquido a 35°C. (kg/l)	Volumen de expansión.	Conductividad térmica. W/(m*K)	Viscosidad a 55°C (mm ² /s)	Corrosión	Amenaza para el agua	
SP 22 A17	22	22-24. Típico es: 23°C	21-19. Típico es 20°C	(Rango 13-28°C)150	1.49	1.43	ΔT 20°C. (%) 4.03	0.6	111.1	Corrosivos en comparación con el metal	Clase de peligro 1 (WGK).	
SP25 A8	25	26	25	(Rango 15-30°C)180	(Densidad a -15°C:) 1.38	(1K). 0.001		0.6	Adelgazamiento por corte	-	-	

Tabla A0-3 Características sales hidratadas sin encapsulado. Fuente rubitherm.com

SALES HIDRATADAS ENCAPSULADAS									
TEAP	Cambio de fase (°C)	Subcomisión de refrigeración (°C)	Peso específico	Calor latente práctico. (J/gr)	Calor latente teórico. (J/gr)	Calor específico aproximado en PCM. (J/gr/°C)	Conductividad térmica. (W/m/°C)	Estabilidad térmica. (ciclos)	Máxima temperatura de funcionamiento (°C)
18T	17-19	Máximo 2	1.48-1.50	175	188	2	1	>10.000	100
20T	19-20	Máximo 2	1.48-1.50	175	188	2	1	>10.000	100
25T	24-26	Máximo 2	1.48-1.50	175	188	2	1	>10.000	100
29T	28-30	Máximo 2	1.48-1.50	175	188	2	1	>10.000	100
32S	31-32	Mínima	1.45	230	>200	2	0.6	>10.000	100
34S	33-34	Mínima	1.45	250	>220	2	0.6	>10.000	100
36S	36	Mínima	1.45	260	>230	2	0.6	>10.000	100
48S	31-32	Mínima	1.45	260	>230	2	0.6	>10.000	100
TEAP	Cambio de fase (°C)	Rango de temperatura (°C)	Capacidad de liberación aproximado con el agua.	Calor latente práctico. (Wh/l)	Calor sensible sólido. (Wh/°C)	Calor sensible líquido. (Wh/°C)	Estabilidad térmica.	Máxima temperatura de funcionamiento (°C)	
TH29	29	26-32	29 veces más	79	0.67	0.99	Con aditivos	45	
TH58	58	55-61	13 veces más	80.7	1.12	1.63	Con aditivos	75	
TH89	89	86-92	10 veces más	63.3	0.84	1.29	Con aditivos	105	

Tabla A0-4 Características sales hidratadas encapsuladas. Fuente teappcm.com

LIGADO A OTRO MATERIAL												
BASF	Tipo de material	Ligado a otro material	Punto de fusión. (°C)	Rango de aplicación. (°C)	Capacidad almacenamiento de calor. (kJ/kg)	Capacidad de calor latente (kJ/kg)	Tipo de producto	Contenido sólido. (%)	Densidad (kg/m3)	Densidad aparente (kg/m3)	Viscosidad (mPas)	
DS 5000	Parafina	Agua	26	10-30	59	45	Dispensión	42	0.98	-	200-600	
DS 5007	Parafina	Agua	23	10-30	55	41	Dispensión	42	0.98	-	200-600	
DS 5030	Parafina	Agua	21	10-30	51	37	Dispensión	42	0.98	-	200-600	
CLIMATOR	Tipo de material	Ligado a otro material	Punto de fusión. (°C)	Temperatura máxima (°C)	Capacidad almacenamiento de calor. (Wh/kg)	Calor latente de fusión. (Wh/kg)	Calor específico aproximado en PCM. (Wh/kg/°C)	Densidad. (kg/l)	Conductividad térmica. (W/m/°C)			
C7	Sal hidratada	Aditivos	7	60	(Rango 0-15°C)54	39	1	1.42	0.5-0.7			
C21-22	Sal hidratada	Aditivos	21-22	60	(Rango 14-34°C)60	40	1	1.45	0.5-0.7			
C24	Sal hidratada	Aditivos	24	60	(Rango 15-35°C)60	40	1	1.48	0.5-0.7			
C28	Sal hidratada	Aditivos	28	60	(Rango 20-40°C)65	45	1	1.45	0.5-0.7			
C32	Sal hidratada	Aditivos	32	60	(Rango 0-15°C)65	45	1	1.45	0.5-0.7			
C48	Sal hidratada	Aditivos	48	70	(Rango30-60°C)93	63	1	1.36	0.5-0.7			
RUBITHERM	Tipo de material	Ligado a otro material	Punto de fusión. (°C)	Área de fusión. (°C)	Capacidad alm. de calor. (kJ/kg)	Calor específico. (kJ/kg/°C)	Densidad a granel. (kg/l)	Conductividad térmica (W/m/°K)	Volumen de expansión. (%)	Punto de inflamación del PCM. (°C)	Temperatura de funcionamiento máxima. (°C)	Corrosión
PX 42	Parafina	Sílice	41	38-43	114	1.6	0.694	0.1	No	220	52	Químicamente inerte
PX 50	Parafina	Sílice	49	45-51	110	1.6	0.694	0.1	No	192	70	Químicamente inerte
PX 58	Parafina	Sílice	58	55-59	117	1.6	0.694	0.1	No	222	90	Químicamente inerte
PX 82	Parafina	Sílice	82	77-85	116	1.6	0.694	0.1	No	270	110	Químicamente inerte
GR42 (0.2-0.6)	Parafina	Sílice	41	38-43	57	1.5	0.849	0.2	No	190	70	Químicamente inerte
GR42 (1-3)	Parafina	Sílice	41	38-43	57	1.5	0.800	0.2	No	190	70	Químicamente inerte
GR50 (0.2-0.6)	Parafina	Sílice	49	45-51	55	1.5	0.849	0.2	No	190	70	Químicamente inerte
GR50 (1-3)	Parafina	Sílice	41	38-43	55	1.5	0.849	0.2	No	190	70	Químicamente inerte
GR82 (0.2-0.6)	Parafina	Sílice	82	77-85	58	1.5	0.800	0.2	No	270	110	Químicamente inerte
GR82 (1-3)	Parafina	Sílice	82	77-84	58	1.5	0.800	0.2	No	270	110	Químicamente inerte

Tabla A0-5 Características en situación de ligado a otro material. Fuentes www.rubitherm.com / www.micronal.de / www.climator.com

ANEXO IV: CARACTERÍSTICAS 2080M 17 & M25



resoltech 2080M 17 & M25

Hardeners 2083M-2085M

Structural epoxy foaming systems



New hardener 2083M CMR Free

- Final density of 170 or 250 kg/m³
- Can be released from the mold without post curing
- T_g up to 110°C
- Excellent thermo-mechanical properties
- hydrophobic and rot-proof

INTRODUCTION

RESOLTECH 2080 M are liquid foaming epoxy casting systems formulated to produce **low density, closed cell, structural cores**. Those systems have a (free) expansion coefficient from 4.5 to 6.6, enabling the production of **170 and 250 kg/m³ epoxy foams**.

The slow, controlled foaming reaction makes unnecessary the use of mixing machines like with PU foams. The low pressure of the foaming will enable direct casting in the final parts **without conforming moulds** and without alteration of the dimensions of the composite.

This system is available **in black or white** (to be pigmented with any RAL pigment paste available on request).

The main advantages of those epoxy foaming systems over existing systems are :

- No brittle stage after the foaming, making it unnecessary to cure before releasing from mould or to post-cure depending on the mechanical characteristics needed
- Perfect compatibility with preregs and epoxy resins even during their polymerization
- Excellent resistance to water
- Major improvement of thermal and mechanical resistances compared to existing epoxy foams
- Homogeneous structure of the foam
- No VOC emission

MIXING RATIO

The mixing ratio must be accurately followed. It is not possible to change the ratio, it would result in lower mechanical properties. The mixture should be thoroughly stirred to ensure full homogeneity.

Systems	2080M 17 or 2080 M25/2083M	2080M 17 or 2080 M25/2085M
Mixing ratio by weight	100 /35	100/30

APPLICATION

- It is recommended to cast the mix at a temperature around 18°C to 25°C in order to ease the mixing and casting process. The foaming starts 2 minutes after mixing, allow 10% margin for losses during casting.
- Lower temperatures will increase the viscosity of the mix while higher temperatures will reduce the viscosity and the pot life. In both cases, this could have a negative impact on the quality of the foam obtained and the final density after foaming.
- At 23°C, the foam is hard and may be released from the mold after 24h when using 2085M hardener and after 72h when using the 2083M. Without post curing, parts can be used after 7 days at 23°C.
- The curing of the foaming systems is exothermic, considering the thermal insulative properties of the foam, it is mandatory to conduct testings prior to large castings. Anyway, for large castings the use of 2083M is recommended.
- During cold periods, the 2085M may have tendency to crystallize (appearance of a cloudy effect with some crystals). Once crystallized the hardener should not be used. The phenomenon is reversible, and heating the hardener at temperatures between 50°C and 60°C is sufficient to recover a clear liquid. This will not affect the properties of the final product.
- In the case of deep cavities to be filled, it is wise to wet the walls with a liquid resin before foaming to promote foam expansion.

PHYSICAL CHARACTERISTICS

1 Visual aspect

2080 M17 or 2080 M25 :
Opalescent white gel

2083M & 2085M :
Transparent to yellow or black liquid

Mix :
White or black pourable gel

2 Density

Resin	2080 M17			2080 M25		
Hardener		2083M	2085M		2083M	2085M
Density at 23°C	1.17	0.96	0.96	1.17	0.96	0.96
Density of the mix before foaming at 23°C	-	1.12	1.12	-	1.12	1.12
Density of the mix after foaming	-	0.17	0.17	-	0.25	0.25
Free expansion coefficient	-	6.6	6.6	-	4.5	4.5

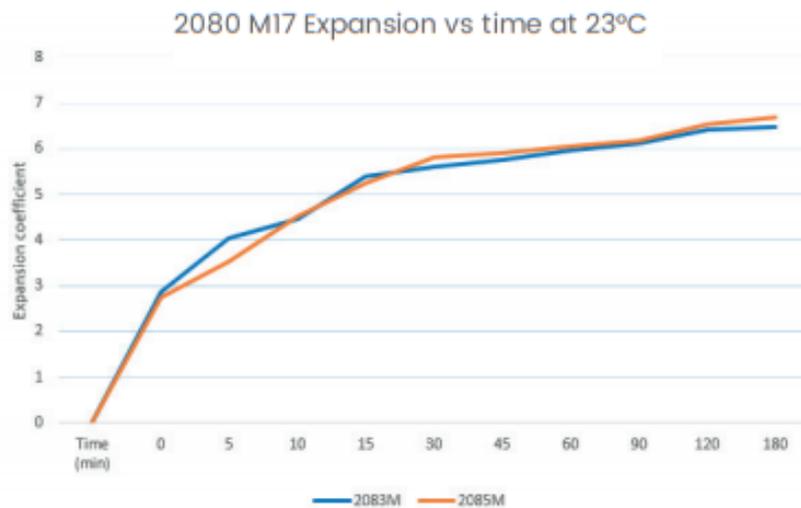
ISO 1575, ± 0.05 tolerance

3 Viscosity

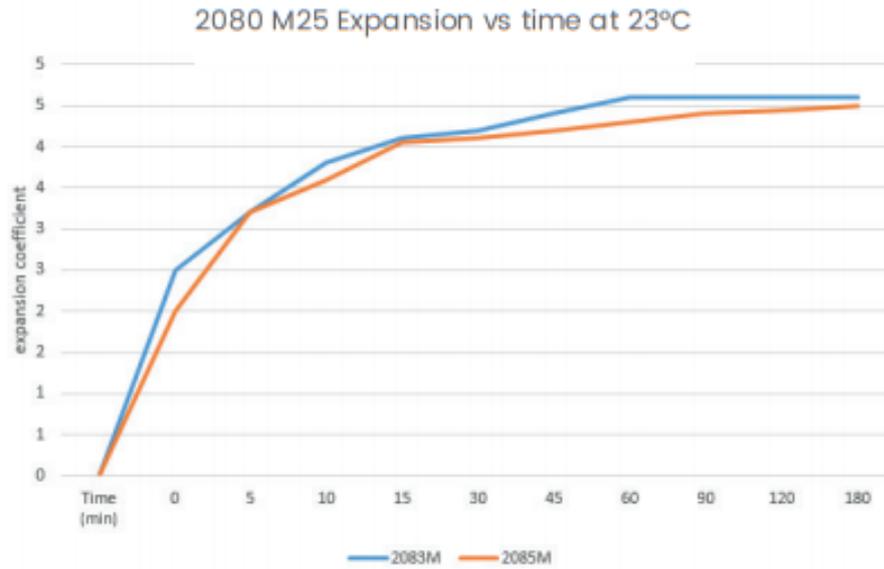
Resin	2080 M17		2080 M25	
Hardener	2083M	2085M	2083M	2085M
Resin viscosity at 23°C (mPa.s)	4000		9600	
Hardener viscosity at 23°C (mPa.s)	42	29	42	29

ISO 12058.2, ± 15% tolerance

FOAMING



Datasheet v5 10/11/2020



CURING AND POST-CURING

In order to obtain the maximum thermo-mechanical properties, it is necessary to respect the recommended curing cycle. The table below shows the glass transition temperatures (DSC) according to different curing cycles.

Resin	2080 M17 / 2080 M25	
Hardener	2083M	2085M
T _g after 14 days at 23°C	54°C	57°C
T _g after 16h at 60°C	76°C	81°C
T _g max after 6h at 60°C + 4h at 80°C	80°C	-
T _g max after 6h at 60°C + 4h at 80°C + 4h at 100°C	-	120°C

T_g measured by DSC, 10°C/min, inflection point

MECHANICAL PROPERTIES

Resin		2080 M17		2080 M25	
Hardener		2083M	2085M	2083M	2084M
14 days at 23°C	COMPRESSION Modulus	136 MPa	102 MPa	151 MPa	138 MPa
	Max strength	2.5 MPa	1.9 MPa	3.6 MPa	2.9 MPa
16h at 60°C	COMPRESSION Modulus	153 MPa	92 MPa	194 MPa	116 MPa
	Max strength	2.9 MPa	2.2 MPa	4.4 MPa	2.2 MPa

ISO 844

Datasheet v5 10/11/2020

PACKAGING

- Box kit of 1kg + hardener
- Bucket kit of 5kg + hardener
- Bucket kit of 25kg + hardener
- Drum kit of 200kg + hardener
- IBC kit of 1t + hardener

TRANSPORT & STORAGE

Keep containers sealed and away from heat and cold preferably between 10°C and 30°C in a well ventilated area. Our products are guaranteed in their original packaging (check expiry date on the label).

HEALTH & SAFETY

Skin contact must be avoided by wearing protective nitrile gloves & overalls or other protective clothing.

Eye protection should be worn to avoid risk of resin, hardener, solvent or dust entering the eyes. If this occurs flush the eye with water for 15 minutes, holding the eyelid open, and seek medical attention.

Ensure adequate ventilation in work areas. Respiratory protection should be worn with ABEKP coded filters.

Resoltech issues full Material Safety Data Sheet for all hazardous products. Please ensure that you have the correct MSDS to hand for the materials you are using before commencing work.



The data provided in this document is the result of tests and is believed to be accurate. We do not accept any responsibility over the mishandling of these products and our liability is limited strictly to the value of the products we manufacture and supply.



249, Avenue Gaston Imbert
13790 ROUSSET
FRANCE

Tel : +33 (0)4 42 95 01 95
Fax : +33 (0)4 42 95 01 98
export@resoltech.com

ANEXO V: FICHA TÉCNICA ALÚMINA MICRONIZADA TIPO 2



FICHA TÉCNICA
TECHNICAL DATA SHEET
Fecha emisión 11/12/2018

PÁGINA 1/1

HIDRATO DE ALUMINA MICRONIZADA TIPO 2 MICRONIZED ALUMINA HYDRATE TYPE 2

DESCRIPCIÓN/ DESCRIPTION

Polvo cristalino blanco.

Crystalin white dust.

IDENTIFICACIÓN/ IDENTIFICATION

Nº EINECS: 215-691-6

Nº CAS: 1344-28-1

APLICACIONES/ APPLICATIONS

Industria del flúor; industria del vidrio; fabricación de TiO₂; como ignífugo en la industria del plástico; como materia prima de otras industrias químicas: fabricación de (SO₄)₃Al₂; fabricación de productos para sedimentación de aguas; catalizador.

Fluor industry; glass industry; TiO₂ manufacturing; as a fireproof in the plastic industry; as a raw material in other chemical industries; (SO₄)₃Al₂ manufacturing; manufacturing of product for water sedimentation; catalyzer.

ANÁLISIS QUÍMICO TÍPICO/ TYPICAL CHEMICAL ANALYSIS

Al₂O₃ 64 % Min.

H₂O (110 °C) 0,2 % Max.

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS/ FISICAL CHARACTERISTICS

TIPO 2 / TYPE 2

100 % < 25 µm

50 % < 5 µm

ENVASES/ PACKAGING

Sacos de papel de 25 Kg, Big-bags y camión-cisterna.

Paper bags of 25 Kg, big-bags and tank truck.

PRECAUCIONES/ WARNINGS

Producto no tóxico excepto en caso de excesivo polvo cuya inhalación puede provocar irritación del tracto respiratorio.

Non toxic product. It can cause skin irritations when inhaled.

TRANSPORTE/ TRANSPORT

No es considerada mercancía peligrosa.

This is not a dangerous good.

RESINAS CASTRO S.L.
Pol. Ind. A Granxa, 3ª Paralela
C/Cíes 190, 36400 O Porriño – ESPAÑA

Tlf.: +34 986 342 955 Fax: +34 986 342 520
E-mail: shop@castrocomposites.com
Web: www.castrocomposites.com

ANEXO VI: ESPECIFICACIONES PARAFINA REFINADA 56-58° CH PR56CH



Pol. Ind. Can Clapers
C/ Can Clapers, 29 2-B
08181 Sentmenat (BCN)

Tel.: 93 715 06 48
www.cerasmarti.com
info@cerasmarti.com

ESPECIFICACIONES

NOMBRE PRODUCTO	PARAFINA REFINADA 56-58° CH
CÓDIGO PRODUCTO	PR56CH

CARACTERÍSTICAS	UNIDADES	LÍMITES		MÉTODO
		Min.	Máx.	
Punto de fusión	°C	56	58	ASTM D 87
Penetración a 25°C	1/10 mm.	16	18	ASTM D 1321
Contenido en aceite	%	-	0,5	ASTM D 721
Color Saybolt	-	25	30	ASTM D 156
Olor	-		0,5	ASTM D 1833

Página: 1 de 1	Fecha de Revisión: 2020	Versión: 003
-----------------------	--------------------------------	---------------------

ANEXO VII: LABORATORIO

El siguiente anexo trata de recopilar las diferentes sesiones de laboratorio explicando lo que se ha realizado en cada una de ellas y el material utilizado.

Sesión 1: Preparación de probetas

El objetivo de esta sesión de laboratorio es preparar las probetas de resina epoxi que posteriormente se van a someter al estudio.

- Fecha: 28 de enero de 2021.
- Lugar: Laboratorio de materiales del edificio de investigación del CUD.
- Material utilizado:
 1. Balanza.
 2. Vasos de precipitado de 200 ml.
 3. Varillas agitadoras de vidrio.
 4. Jeringuillas.
 5. Molinillo eléctrico.
 6. Base epoxi y endurecedor Resoltech ECO.
 7. Aluminio en polvo.
 8. Parafina refinada.
 9. Molde de hielo. Como el objetivo de esta sesión de laboratorio es ver cómo afectan los aditivos, se establecen unos porcentajes en peso de aditivos según:

Componente	1	2	3
Base epoxi	Proporción 100/30 con endurecedor	Proporción 100/30 con endurecedor	Proporción 100/30 con endurecedor
Endurecedor	Proporción 30/100 con epoxi	Proporción 30/100 con epoxi	Proporción 30/100 con epoxi
PCM	10%	20%	30%
Polvo de Aluminio	5%	10%	15%

Tabla A0-6 Porcentaje de componentes en la matriz epoxi

Todas las probetas suman un peso final de 23g, por lo que los porcentajes que se relacionan en la Tabla A0-7 se corresponden con el porcentaje en peso del componente de la matriz. De manera que el contenido de las mismas queda así:

	Resina epoxi (g)	Endurecedor (g)	PCM (g)	Polvo Aluminio (g)
M-1	16	3,96	2,1	1,05
M-2	15,1	3,72	2,1	2,1
M-3	14,2	3,5	2,1	3,15
M-4	14,2	3,5	4,2	1,05
M-5	13,2	3,3	4,2	2,1
M-6	12,3	3	4,2	3,15
M-7	12,3	3	6,3	1,05
M-8	11,35	2,8	6,3	2,1
M-9	10,4	2,6	6,3	3,15

Tabla A0-7 Composición matrices

Una vez realizadas las composiciones, se deja reposar en el molde para que se desarrolle lo que se conoce como proceso de curado, que llevará, indicado por el fabricante, el tiempo de una semana (7 días).



Figura A0-1 Matrices

Sesión 2: Ensayo de dureza

- Fecha: 6 de febrero de 2021.
- Lugar: Laboratorio de materiales del edificio de investigación del CUD.
- Material utilizado:
 - Durómetro PCE-DX AS
 - Matrices

Para la realización de los ensayos de dureza se procedió como se detalla en el apartado 3.2.1

Sesión 3: Análisis termogravimétricos

- Fecha: del 7 de febrero de 2021 al 16 de febrero de 2021.
- Lugar: Laboratorio de materiales del edificio de investigación del CUD.
- Material utilizado:
 - Equipo Labsys Evo 1180
 - Muestras de las matrices
 - Balanza de alta precisión del laboratorio de química de investigación.
 - Cúter
 - Disolución HCl al 7% y acetona.
 - Crisoles de alúmina.
 - Pinzas.
 - Probetas del Box-Behnken.

El análisis de las probetas se ha realizado por partes ya que el equipo consume una gran cantidad de agua potable y no conviene dejarlo encendido si no se va a apagar el equipo cuando acabe el ciclo de calentamiento.

Por ello se ha dividido de la siguiente manera:

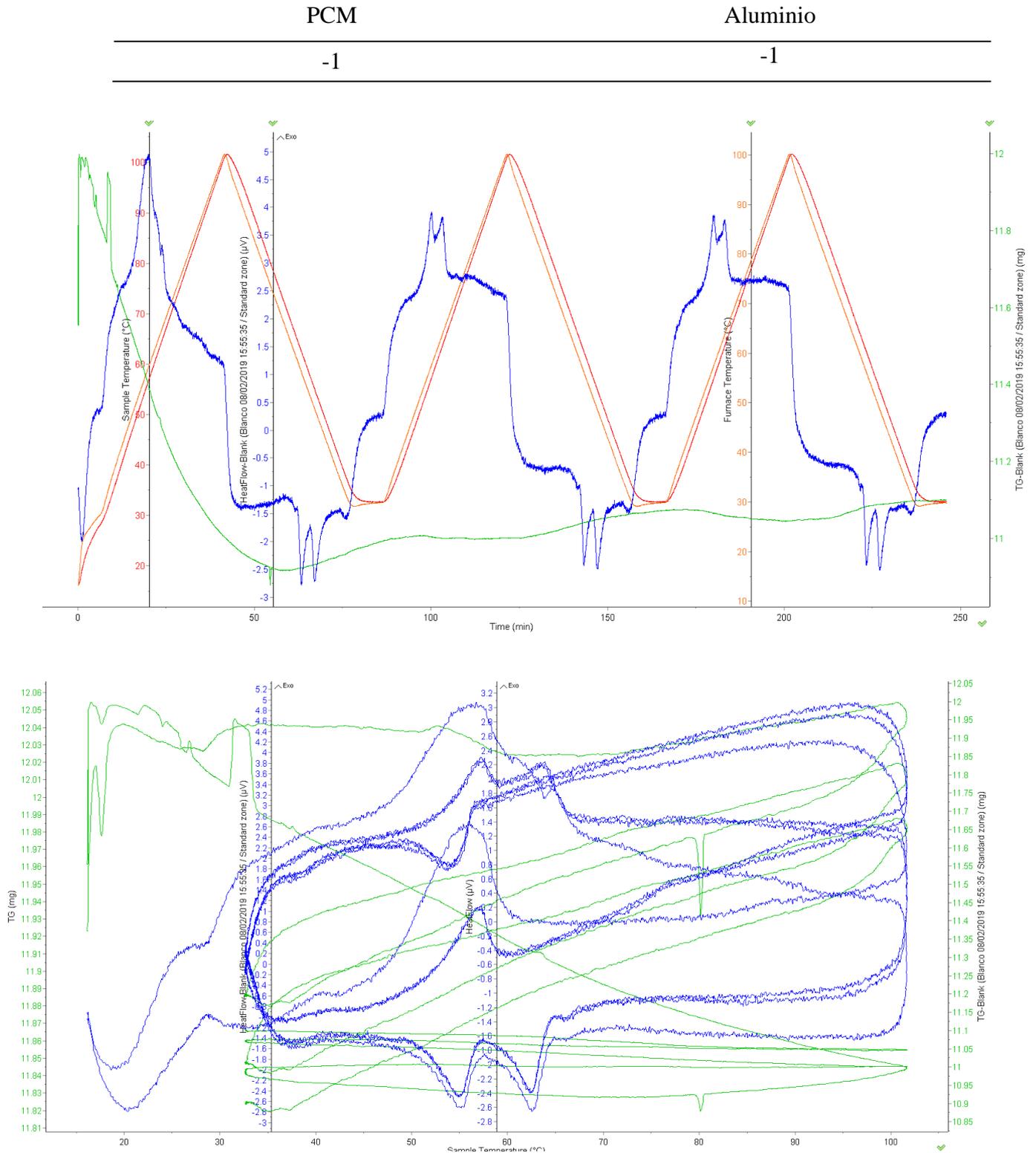
- 7 de febrero: análisis termogravimétrico del blanco de crisoles de alúmina.
- 8 de febrero: análisis TG muestras M-1 y M-2
- 9 de febrero: análisis TG muestras M-3
- 11 de febrero: análisis TG muestras M-4 y M-5
- 12 de febrero: análisis TG muestras M-6 y M-7
- 16 de febrero: análisis TG muestras M-8 y M-9.

Para agilizar el proceso en la creación de un nuevo experimento se guarda el en las propiedades del proceso el ciclo al que van a ser sometidas todas las muestras, de manera que no hace falta introducir los datos cada vez que se quiere hacer un nuevo análisis. Como en todas las muestras a analizar el crisol ha sido el mismo (Al₂O₃ 100µl), el primer día se creó el blanco que se va a restar a todos los análisis posteriores. Para ello se colocaron los dos crisoles en la caña sin ningún tipo de muestra y se le somete al mismo ciclo al que van a ser sometidas el resto de las muestras de manera que al finalizar el análisis, se puede restar el efecto de los crisoles en la adquisición de datos. Para todos los análisis realizados se trata de coger la muestra aproximadamente en la misma zona para establecer el mismo criterio para todas. Para ello se hace un corte diagonal y se cortan lascas de la matriz hasta conseguir el peso de 35mg en la balanza de precisión.

Se procede como se detalla en el apartado 3.2.2

ANEXO VIII: GRÁFICAS ANÁLISIS TG

- Probeta M-1



Gráfica A0-1 Análisis TG M-1

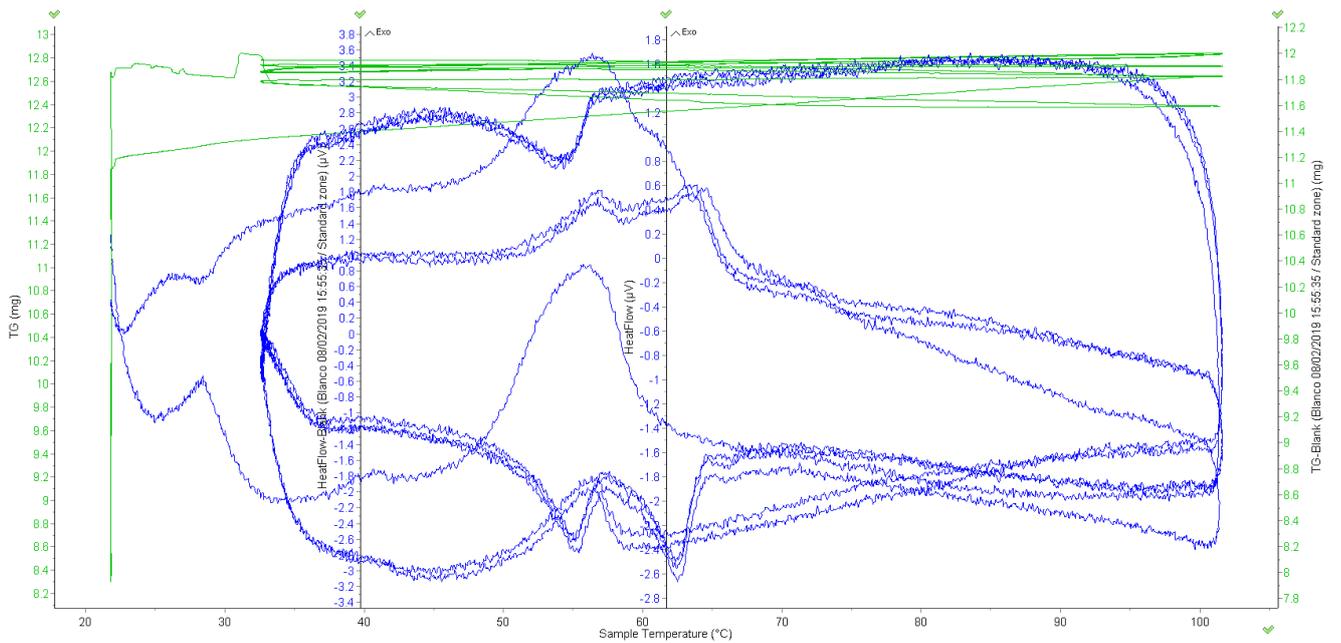
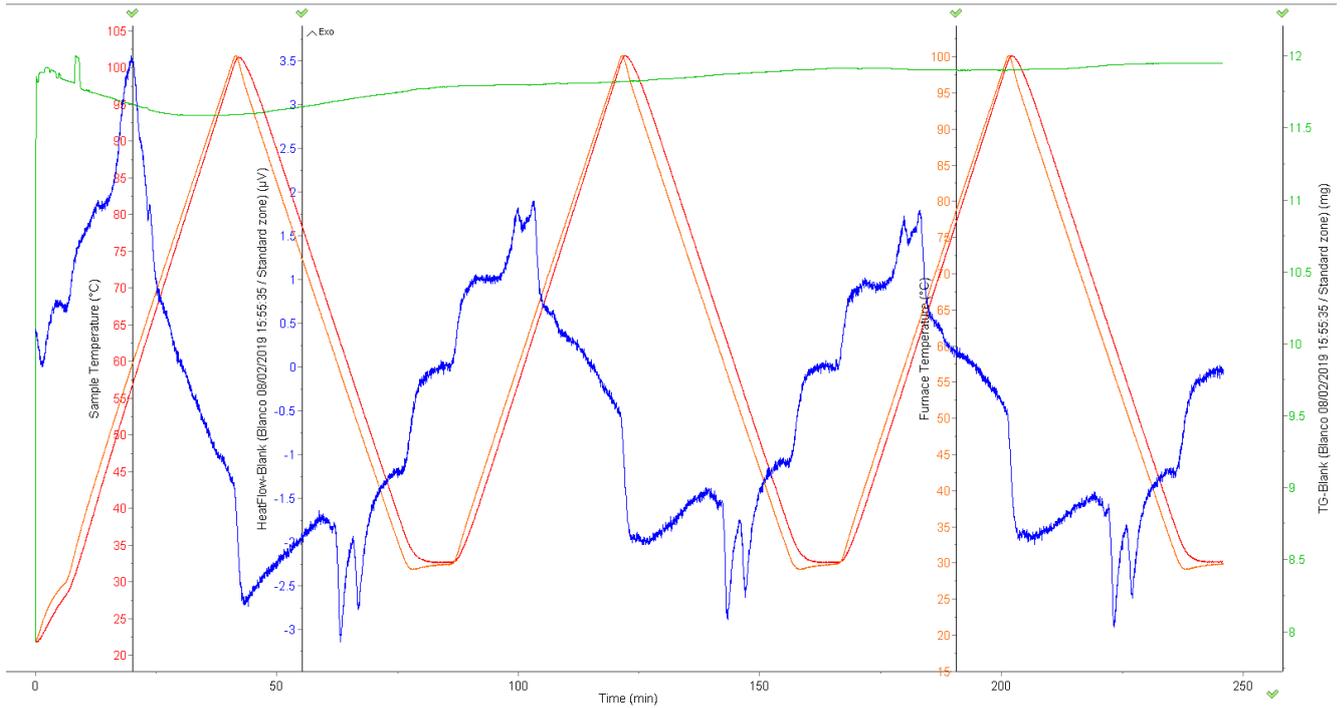
- Probeta M-2

PCM

Aluminio

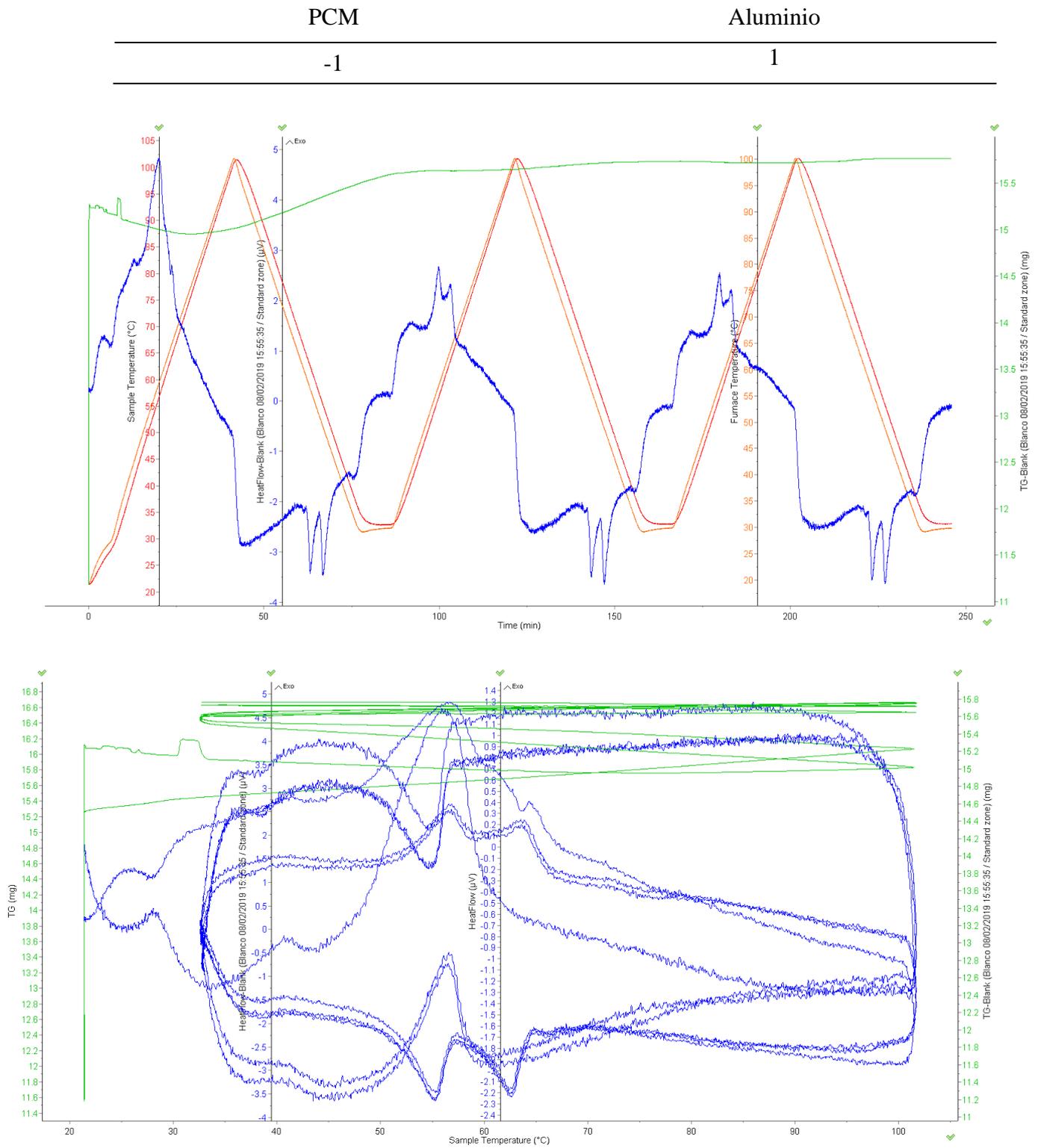
-1

0



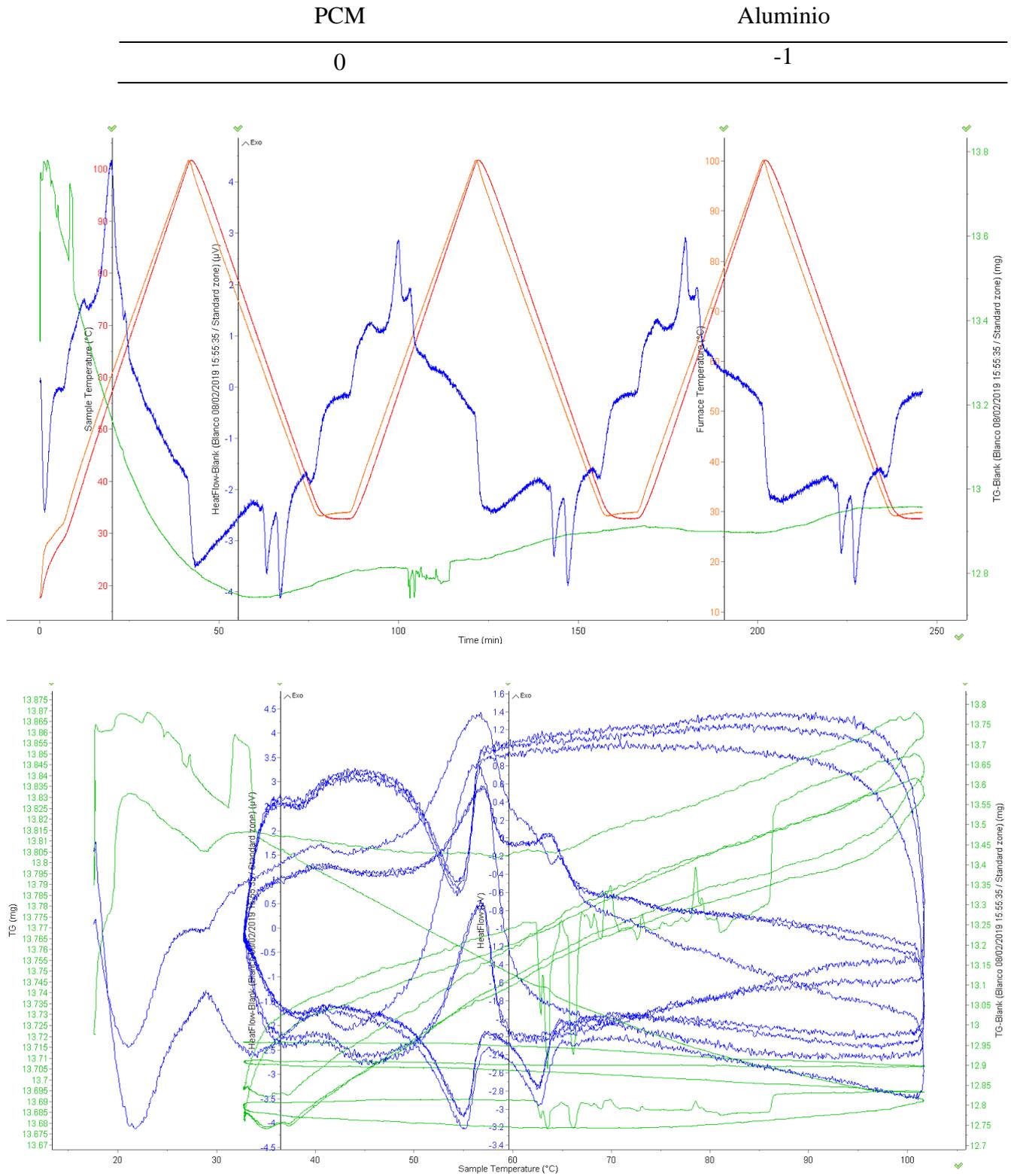
Gráfica A0-2 Análisis TG M-2

- Probeta M-3



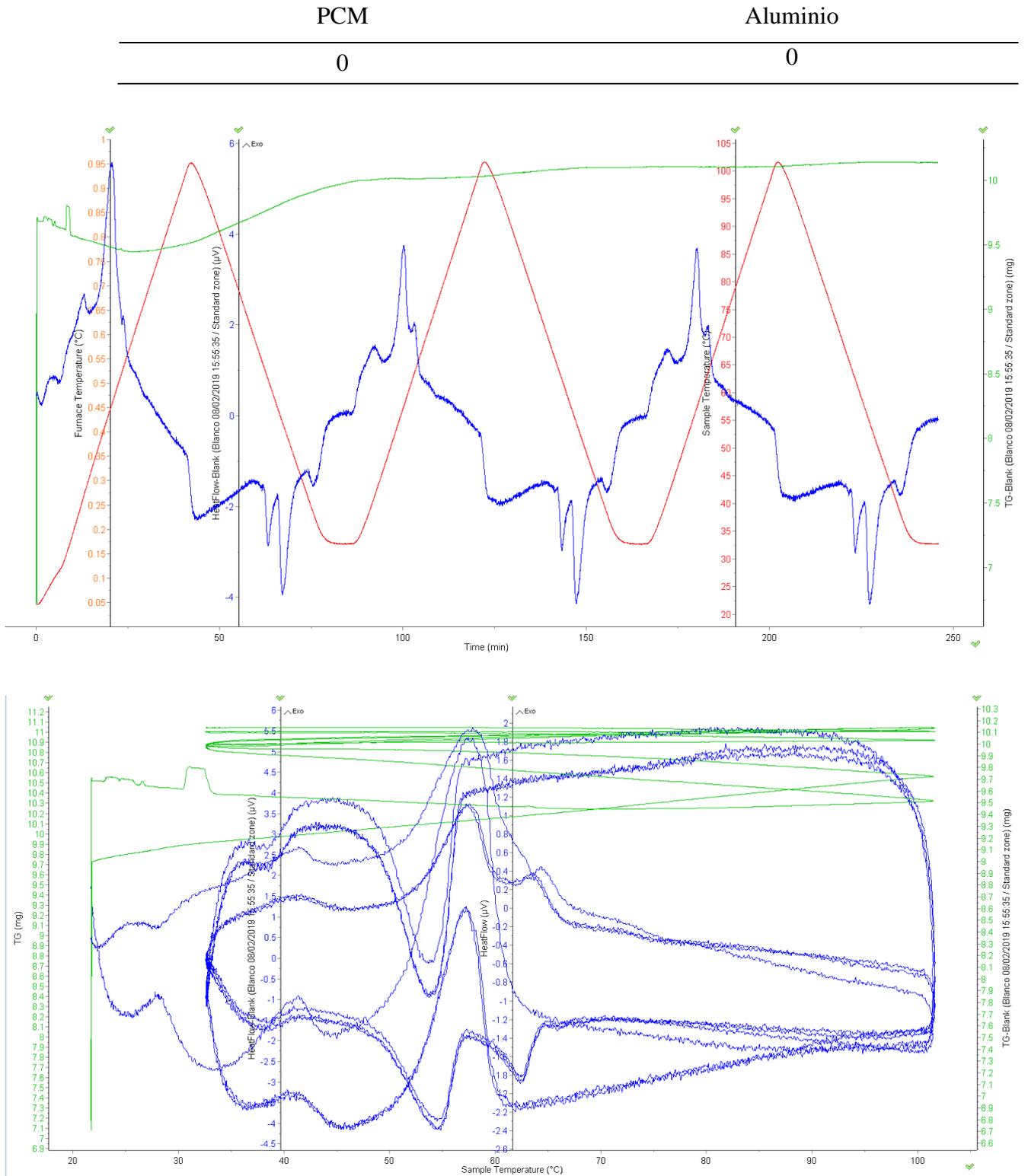
Gráfica A0-3 Análisis TG M-3

- Probeta M-4



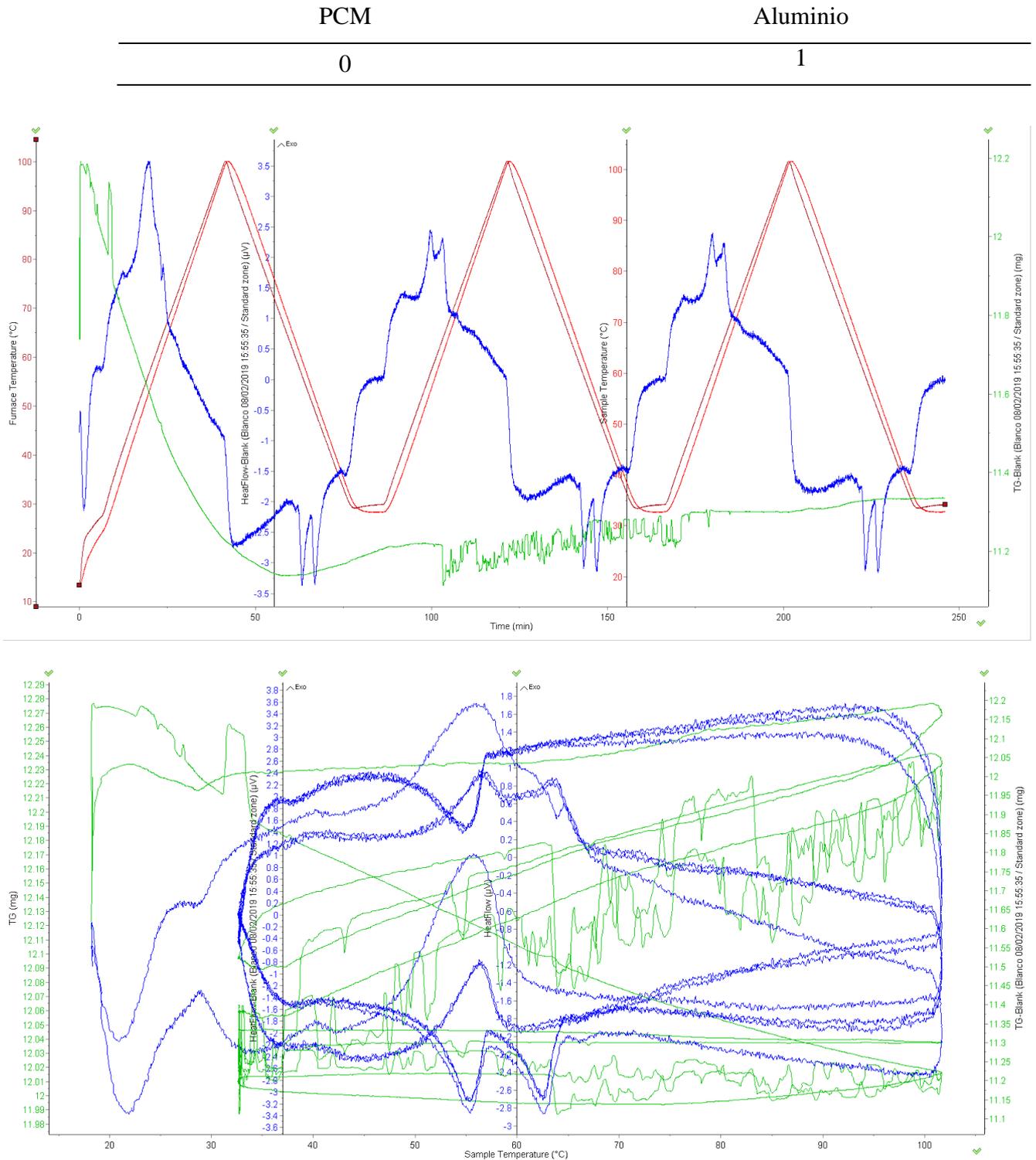
Gráfica A0-4 Análisis TG M-4

- Probeta M-5



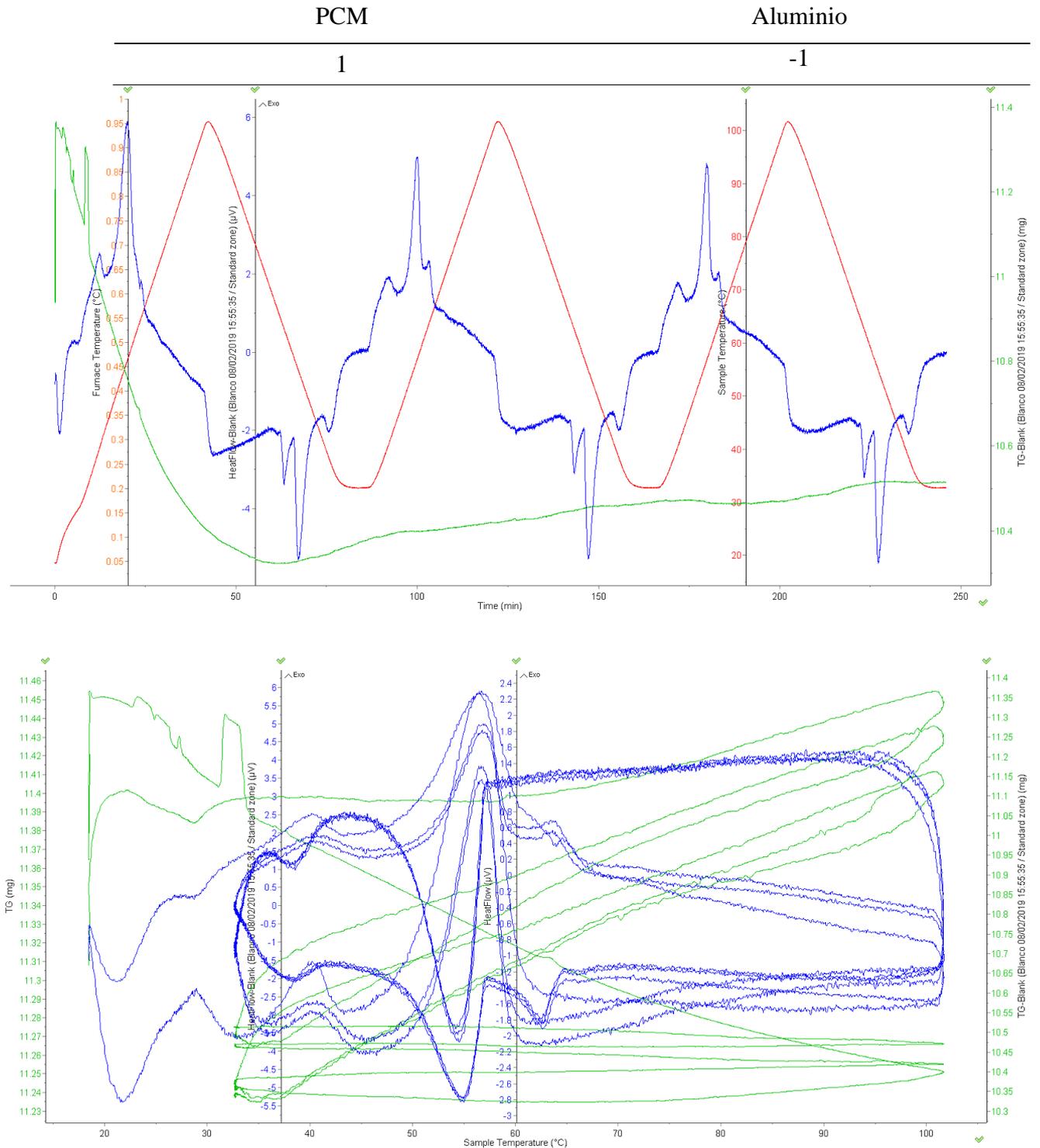
Gráfica A0-5 Análisis TG M-5

- Probeta M-6



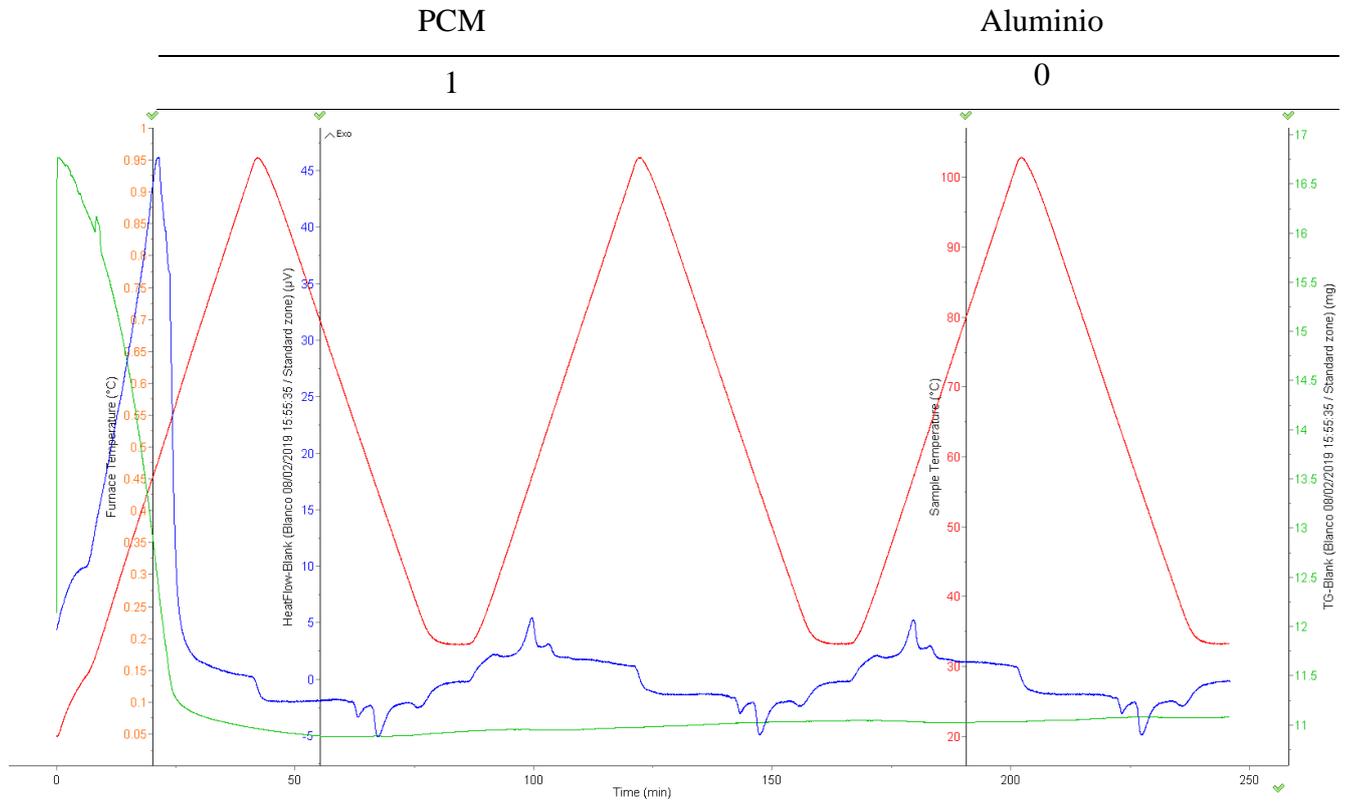
Gráfica A0-6 Análisis TG M-6

- Probeta M-7



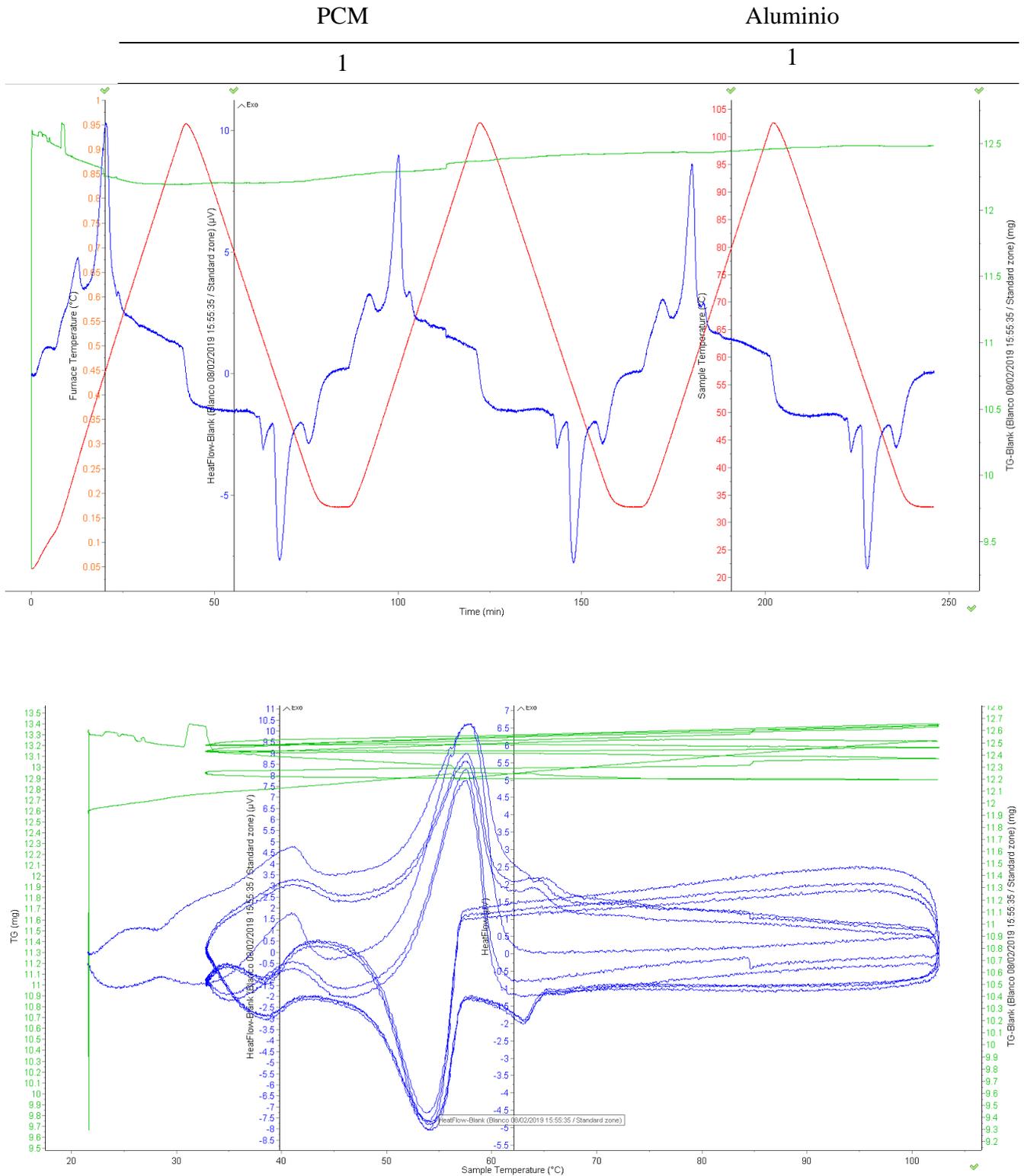
Gráfica A0-7 Análisis TG M-7

- Probeta M-8



Gráfica A0-8 Análisis TG M-8

- Probeta M-9



Gráfica A0-9 Análisis TG M-9