Resumen

El presente proyecto final de carrera contiene el diseño y construcción de un dispositivo experimental para aplicar el método T-history a materiales de grandes dimensiones y con forma definida. Se describen los detalles constructivos, de fabricación, parámetros a tener en cuenta y pasos a seguir para la realización del ensayo y para el posterior análisis de resultados. También se ha realizado un presupuesto detallado de la fabricación, y un estudio de sostenibilidad tanto para el proyecto como para cada ensayo realizado.

Fundamentalmente el método se basa en la aplicación de un flujo térmico constante a dos probetas en contacto con un foco caliente, con el fin de obtener un gradiente de temperatura en dichas probetas. Mediante sondas en ambas probetas se registra la temperatura interna de los materiales. A partir de los datos obtenidos es posible evaluar la inercia térmica, y la variación de temperatura en función del tiempo de ensayo.

El dispositivo experimental consta de un bloque de aislante exterior, en el que se colocan las dos probetas y la fuente de calor. Dentro de estas probetas se introducen sondas de temperatura tipo Pt-100, y se recogen los datos mediante hardware y software adecuado para ello. La fuente de calor se basa en una resistencia eléctrica que se conecta a una fuente de alimentación con el fin de regular la potencia térmica suministrada.

Con el dispositivo experimental se pretende tener la historia térmica de un material no homogéneo y mediante comparación con un material homogéneo, determinar si la inclusión de materiales de cambio de fase (PCM) en el material de estudio resulta beneficiosa para aumentar la inercia térmica del material.

También se realiza un presupuesto detallado de las materias primas, accesorios y energía necesarios para la fabricación del dispositivo, y de cada ensayo. Así como el estudio de la sostenibilidad, en el que se refleja el coste energético del proyecto.

Índice

RESUMEN 1

ÍNDICE 3

1. PREFACIO 5

2. INTRODUCCIÓN 7

2.1. Objetivos del proyecto 7

2.2. Justificación 7

3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS 9

3.1. El método T-history 9

3.2. Paneles de yeso con capacidad de almacenamiento de calor latente 12

3.3. La incorporación de PCM en la envolvente del edificio 16

4. DESCRIPCIÓN Y CONSTRUCCIÓN DEL DISPOSITIVO 21

4.1. Unidad calefactora 22

4.2. Carcasa aislante 24

4.3. Instrumentación de medida y registro 26

4.4. Fuente de alimentación 29

5. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS 31

5.1. Fabricación de una probeta de muestra 32

5.1.1. Fabricación de una probeta de cemento 35

6. FUNCIONAMIENTO Y CONFIGURACIÓN DEL DISPOSITIVO T-HISTORY 37

7. PROCEDIMIENTO OPERATORIO 39

8. EXPERIMENTOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS 41

8.1. Configuración de los experimentos 41

8.2. Experimento inicial con probetas de referencia 43

8.2.1. Configuración referencia-referencia, 15V 43

8.2.2. Configuración referencia-referencia, 20V 45

8.2.3. Configuración referencia-referencia, 22 y 25V 47

8.3. Experimentos con probetas de yeso 51

8.3.1. Configuración referencia-PCM 5% 52

8.3.2. Configuración referencia-PCM 10% 54

8.3.3. Configuración referencia-PCM 15%.....56
8.4. Experimentos con probetas de cemento.....58
8.4.1. Configuración referencia-PCM 5%.....59
8.4.2. Configuración referencia-PCM 10%.....61
8.4.3. Configuración referencia-PCM 15%.....63
8.5. Experimentos adicionales.....65
8.5.1. Experimento con un espacio vacío.....66
8.5.2. Experimento con aislante.....69

9. PROPUESTA DE MEJORA DEL DISPOSITIVO T-HISTORY _____ 71

10. PRESUPUESTO _____ 75

11. INFORME DE IMPACTO AMBIENTAL _____ 81

CONCLUSIONES _____ 85

AGRADECIMIENTOS _____ 87

BIBLIOGRAFÍA _____ 89

Referencias bibliográficas.....89

1. Prefacio

El presente proyecto final de carrera surge como medida para estudiar la mejora de la eficiencia energética de edificios, a fin de reducir costes por pérdidas energéticas y emisiones de CO_2.

La construcción y uso de edificios genera en Cataluña más del 40% de las emisiones de CO2 a la atmósfera y actualmente se constata, en un gran número de edificios, una tendencia al crecimiento del consumo de energía primaria proveniente de fuentes no renovables que puede reducirse mediante una mejora en el aislamiento térmico de las envolventes de los edificios. [1]

Los edificios incluyen aislamiento en su construcción por la disminución de consumo energético que esto conlleva. Este ahorro energético en calefacción y aire acondicionado se traduce directamente en una disminución de las emisiones de CO2. Cálculos teóricos preliminares constatan que un edificio típico de oficinas con aislamiento disminuye entre un 22 y un 52% sus emisiones de CO2 anuales con respecto al mismo edificio sin ningún tipo de aislamiento. [1]

El Decreto de Ecoeficiència de la Generalitat de Cataluña de 2006 dice que las partes macizas de los diferentes cerramientos verticales exteriores de los edificios, tanto si son sobreexpuestos, expuestos o protegidos, según NREAT/ 87, incluyendo los puentes térmicos integrados en estos cerramientos, como contornos de aberturas, pilares de fachada, cajas de persiana u otros, tendrán unas soluciones constructivas y de aislamiento térmico que aseguren un coeficiente medio de transmitancia térmica Km = 0,70 W/m^2K. [1]

El Código Técnico de la Edificación subraya en su Artículo 15 “Exigencias básicas de ahorro de energía HE” que el objetivo del requisito básico “Ahorro de energía” consiste en conseguir un uso racional de la energía necesaria para la utilización en los edificios, reduciendo a límites sostenibles su consumo y conseguir asimismo que una parte de este consumo proceda de fuentes de energía renovable, como consecuencia de las características de su proyecto, construcción, uso y mantenimiento. [1]

Además, el artículo 15.1, que se transcribe a continuación, subraya la importancia de la limitación de la demanda energética en los edificios: [1]

15.1 Exigencia básica HE 1: Limitación de demanda energética

> Los *edificios* dispondrán de una envolvente de características tales que limite adecuadamente la *demanda energética* necesaria para alcanzar el *bienestar térmico* en función del clima de la localidad, del uso del edificio y del régimen de verano y de invierno, así como por sus características de aislamiento e inercia, permeabilidad al aire y exposición a la radiación solar, reduciendo el riesgo de aparición de humedades de condensación superficiales e intersticiales que puedan perjudicar sus características y tratando adecuadamente los *puentes térmicos* para limitar las pérdidas o ganancias de calor y evitar problemas higrotérmicos en los mismos.

Según esta reglamentación, la demanda térmica en edificios queda limitada según la zona climática, pero lo que no queda especificado es cómo se comprueba que los aislamientos utilizados son los más adecuados. [1]

2. Introducción

2.1. Objetivos del proyecto

Los dos objetivos principales del proyecto vienen definidos por su desarrollo, el primero se debe a la fase de diseño, selección de materiales y componentes, fabricación y montaje del dispositivo.

Como segundo objetivo cabe destacar la validación y calibración del dispositivo diseñado. A este objetivo corresponde la comprobación de que los datos obtenidos son significativos y que el comportamiento del material a ensayar es el esperado por sus características.

La validación del dispositivo consiste esencialmente en determinar si se puede observar el efecto que produce la inclusión de materiales de cambio de fase (PCM) en determinados materiales.

Como objetivos personales se puede señalar la realización de un proyecto de rigor y calidad científica y el aprendizaje de una metodología de trabajo de investigación que me sea de utilidad de cara a mi comienzo profesional en el mundo laboral.

2.2. Justificación

En este apartado se explica que el presente proyecto está englobado en un proyecto industrial mayor que estudia la incorporación de materiales de cambio de fase (PCM) en diversos materiales y sistemas utilizados en construcción.

Se ha visto que en la bibliografía no se encuentran estudios sistemáticos comparativos del comportamiento de aislantes en edificaciones reales. La mayor parte de los estudios se realizan con cálculos teóricos o simulaciones.

Además, la mayor parte de las simulaciones son difícilmente verificables, ya que en edificios reales, las ganancias o pérdidas de calor dependen de tantos factores que, discernir qué porcentaje de estos cambios se debe sólo al aislamiento, es casi imposible.

Se ha considerado interesante que para la caracterización térmica del material a estudiar, se pudiera observar el efecto de los materiales de cambio de fase introducidos, de manera que pueda compararse de alguna manera el efecto que supone la introducción de los PCM con respecto al material sin PCM.

Para ello, se realiza el presente proyecto y se fabrica el dispositivo descrito a continuación para caracterizar los materiales con diferentes porcentajes de PCM incluido.

3. Fundamentos teóricos

3.1. El método T-history

En los últimos años, los sistemas de almacenamiento de calor latente han ganado mucha importancia debido al aumento de la demanda energética en todo el mundo, ya que estos sistemas son una alternativa para conseguir un ahorro importante de la energía consumida. En particular, las aplicaciones más importantes son las utilizadas en sistemas de energía solar, en sistemas de acondicionamiento de aire y en edificios energéticamente sostenibles.

Estos sistemas utilizan materiales de cambio de fase (PCM) debido a su alta densidad energética y su comportamiento isotérmico durante la carga y descarga. La selección y preparación de un PCM adecuado para un sistema de almacenamiento de calor latente es muy dificultosa, pero también muy importante. Es necesario, por tanto, medir las propiedades térmicas del PCM. [2]

Los métodos disponibles para determinar el calor de fusión, calor específico y punto de fusión son tres: métodos calorimétricos convencionales, análisis térmico diferencial (DTA), y calorimetría diferencial de barrido (DSC). Estos métodos tienen el inconveniente de que para ensayar las muestras, requieren una cantidad muy pequeña de las mismas (1-10mg), y en el caso de los PCM esto puede dar lugar a errores importantes en la medida obtenida.

Puesto que es difícil observar el efecto del cambio de fase de un PCM incorporado en un material de construcción con los métodos calorimétricos anteriormente mencionados, se hace necesario desarrollar un nuevo método, para estudiar las diferentes propiedades térmicas de los materiales de cambio de fase. Además, para el caso concreto de este proyecto, los métodos citados no son adecuados por utilizar cantidades de muestra muy

pequeñas y en este caso las muestras a medir serían de grandes dimensiones (probetas cuadradas de 300 mm de lado).

A la vista de este problema, se aplica el método T-history, con el que se puede determinar punto de fusión, calor específico y conductividad térmica del material ensayado.

Este método está basado en comparar la evolución de la temperatura del material a ensayar con la de otro material de referencia, durante el enfriamiento hasta temperatura ambiente. El material de referencia debe ser tal que sus propiedades térmicas sean bien conocidas, y ambos materiales tienen que estar contenidos en recipientes con la misma geometría para asegurar el mismo coeficiente de transferencia de calor. [2]

Principio de medida

Un tubo que contenga un material de cambio de fase, cuya temperatura sea uniforme e igual a T_0 (siendo T_0 mayor que el punto de fusión del PCM) se expone súbitamente a una atmósfera cuya temperatura es T. La curva resultante de llevar a cabo tal procedimiento, sería la curva temperatura-tiempo, o también llamada T-history.

Cuando el *Bi*=hR/2k, es decir el número de Biot, donde R es el radio del tubo, k la conductividad térmica del PCM y h el coeficiente de transferencia de calor por convección natural en la parte exterior de un tubo) es menos de 0.1, la distribución de temperatura en la muestra puede definirse como uniforme [3]. Entonces se puede hacer el siguiente balance:

$$(m_t c_{p,t} + m_p c_{p,1})(T_0 - T_s) = hA_c A_1 \qquad \text{(Ec. 3.1.1.)}$$

Donde m_p y m_t son las masas del PCM y del tubo respectivamente y $c_{p,l}$ y $c_{p,t}$ son los calores específicos medios del PCM líquido y del tubo respectivamente. A_c es el área de transferencia de calor convectiva del tubo $A_1 = \int_0^t (T - T_{\infty,a})dt$. También se tiene:

$$m_p H_m = hA_c A_2 \quad \text{(Ec. 3.1.2.)}$$

Donde H_m es el calor de fusión del PCM y $A_2 = \int_{t1}^{t2} (T - T_{\infty,a})dt$. El tiempo entre t1 y t2 es el que transcurre durante el cambio de fase. Y también se tiene:

$$(m_t c_{p,t} + m_p c_{p,s})(T_s - T_r) = hA_c A_3 \quad \text{(Ec. 3.1.3.)}$$

Donde $c_{p,s}$ es el calor específico medio del PCM sólido. $A_3 = \int_{t2}^{t3} (T - T_{\infty,a})dt$ y T_r es la temperatura de la referencia.

Si un tubo que contiene agua pura es expuesto súbitamente al mismo ambiente que el descrito más arriba y considerando que Bi<0.1 se tiene análogamente a lo anterior:

$$(m_t c_{p,t} + m_w c_{p,w})(T_0 - T_s) = hA_c A'_1 \quad \text{(Ec. 3.1.4.)}$$

$$(m_t c_{p,t} + m_w c_{p,w})(T_s - T_r) = hA_c A'_2 \quad \text{(Ec. 3.1.5.)}$$

Donde m_w y $c_{p,w}$ son la masa y el calor específico medio del agua respectivamente. $A'_1 = \int_{0}^{t1'} (T - T_{\infty,a})dt$ y $A'_2 = \int_{t1}^{t2'} (T - T_{\infty,a})dt$.

Usando la ecuación (4) se puede encontrar el coeficiente de convección natural en la parte exterior de un tubo (h). Éste es de aproximadamente 5-6 $Wm^{-1}{}^{o}C^{-1}$, así que la condición de Bi<0.1 puede satisfacerse cuando k_s>0.2 $Wm^{-1}{}^{o}C^{-1}$ (ks de los PCM usados es siempre mayor de 0.3 $Wm^{-1}{}^{o}C^{-1}$)

De las ecuaciones (3.1.1.) a (3.1.5.) se obtiene:

$$c_{p,s} = \frac{m_w c_{p,w} + m_t c_{p,t}}{m_p} \frac{A_3}{A'_2} - \frac{m_t}{m_p} c_{p,t} \quad \text{(Ec. 3.1.6.)}$$

$$c_{p,l} = \frac{m_w c_{p,w} + m_t c_{p,t}}{m_p} \frac{A_1}{A'_1} - \frac{m_t}{m_p} c_{p,t} \quad \text{(Ec. 3.1.7.)}$$

$$H_m = \frac{m_w c_{p,w} + m_t c_{p,t}}{m_p} \frac{A_2}{A_1^{'}} (T_0 - T_s) \text{ (Ec. 3.1.8.)}$$

De esta manera se observa que se pueden calcular el calor específico del PCM en fase sólida y líquida, su energía de cambio de fase y a partir de éstas, la conductividad térmica del PCM. [2]

Comparado con los demás métodos disponibles como la calorimetría convencional y el DSC, el método T-history tiene algunas características a destacar.

El sistema experimental es simple, se pueden hacer experimentos con muchas muestras y obtener diversas propiedades termofísicas de cada PCM, la precisión de las medidas satisface los requisitos para aplicaciones ingenieriles y el proceso de cambio de fase de cada PCM puede ser observado claramente. [2]

Este método es útil para medidas rápidas del PCM candidato para uso en aplicaciones ingenieriles de almacenamiento de calor latente. El método es también aplicable para un rango mayor de temperaturas si un baño termostático de aceite u otro líquido que sea adecuado se usan en vez de agua. [2]

3.2. Paneles de yeso con capacidad de almacenamiento de calor latente

Los paneles de yeso impregnados con materiales de cambio de fase proporcionan almacenamiento de calor distribuido por toda la envolvente del edificio que delimitan, permitiendo así un diseño que pueda aprovechar la energía solar. La energía almacenada de esta manera depende de varios factores: la temperatura de fusión del material de

cambio de fase, el rango de tiempo durante el que ocurre dicha fusión y la capacidad latente por unidad de área del muro. [4]

Los estudios realizados para determinar el comportamiento de muros con PCM incorporado se han llevado a cabo con pares de habitaciones. En una de ellas los muros son ordinarios y en la otra, idéntica a la anterior, los muros contienen materiales de cambio de fase. La historia térmica de ambas habitaciones y flujos de calor pueden compararse de esta manera. [5]

Dinámica térmica de un muro ideal con PCM

Para poder estudiar el comportamiento térmico de dichos muros, es necesario investigar como se almacena y disipa la energía en el ciclo de un día.

Un muro ideal con PCM tiene una gran capacidad conductora y una capacidad latente ilimitada, a una misma temperatura de fusión del PCM. La temperatura es uniforme por todo el muro, y este siempre puede aceptar energía si la habitación supera la temperatura de fusión. Una parte o toda la energía puede ser extraída del muro cuando la temperatura de la habitación es menor que la de fusión del PCM. Durante cualquier parte del ciclo en el que el PCM esté totalmente descargado, el muro no tiene capacidad calorífica (relativa al contenido de PCM del mismo) y tiene la misma temperatura que la habitación. El muro está en contacto con una habitación en la que la temperatura varía. Se considera que la superficie exterior del muro, la más alejada de la habitación, es una frontera en la que no hay flujo, como sería el caso de una partición de una pared en un edificio. La energía transferida al muro sería: [4]

$$Q = h\int_0^T (T_{hab} - T_{fusión})dt \quad \text{(Ec. 3.2.1.)}$$

En la ecuación anterior solo se tienen en cuenta los intervalos en los que la temperatura de la habitación es mayor que la de fusión del PCM.

Si tenemos en cuenta estancias con ciclos de temperatura sinusoidal y rectangular, mediante la ecuación anterior se puede calcular la energía almacenada por el muro en

ambos casos. Si disponemos de las curvas de temperatura de ambas estancias, se puede integrar la ecuación para su análisis. Para los dos casos, se tiene que la energía máxima almacenada por el muro se obtiene cuando la temperatura de fusión del PCM iguala a la temperatura media de la pared. Este dato aporta información para los criterios de selección de PCM según cada caso concreto, dependiendo de la temperatura media de la pared.

Muro interior con temperatura real

Mediante simulación numérica, se puede examinar el almacenamiento diario de calor latente de una pared interior real de un edificio real, con PCM y sometida a una historia térmica real. En este caso, la transferencia de calor con el ambiente ocurre tan solo en una superficie del muro, en una partición interior del edificio.

Ácidos grasos y parafinas se han impregnado con éxito en paredes de yeso. Las temperaturas de fusión de estos PCM se han ajustado mediante mezclas de diferentes componentes. Estas mezclas no son eutécticas, y en consecuencia, el cambio de fase ocurre en un rango de temperaturas, lo que quiere decir que la transición tiene un ancho finito.

Utilizando una función Gaussiana para el análisis de la capacidad latente, se obtiene un rango de cambio de fase de 2,3 ºC los PCM citados anteriormente.

Considerando un flujo de energía en un muro interior, asumiendo una historia de temperatura similar a la de edificios solares con almacenamiento térmico, se puede llevar a cabo un análisis semejante al anterior. Se simula la respuesta de la pared al periodo asumido de variación de la temperatura de la estancia, utilizando el método de elementos finitos. La pared simulada es de 12,7 mm de espesor, que es una medida estándar en construcción, el coeficiente de transferencia de calor de la superficie en el lado de la habitación se fija a 5,67 o 8,3 W/m^2ºC. La superficie exterior de la pared es un límite en el que no hay flujo de calor. [4]

Se observa que la energía acumulada durante el día por la pared alcanza unos picos máximos que sobrepasan la capacidad latente del PCM. Esto ocurre debido a que la pared tiene una cierta capacidad sensible de almacenamiento de calor. Para un intervalo de transición de 0,5 ºC se puede comprobar asimismo que la capacidad máxima de almacenamiento de calor se da cuando la temperatura de fusión iguala la temperatura media de la estancia, que es también la temperatura media de la pared. Para un intervalo de 4 ºC, se tiene que el almacenamiento máximo ocurre a una temperatura de fusión de unas décimas de grado mayor, porque entonces parte de la capacidad latente se da fuera del límite inferior de temperatura de la habitación. Si la temperatura de fusión difiere demasiado de la media de la habitación, o la transición es demasiado amplia, el almacenamiento de calor latente disminuye drásticamente, aunque la capacidad de almacenamiento de la pared no cambia. Esto ocurre porque una gran parte del cambio de fase del PCM ocurre fuera del rango de temperatura de la habitación. [4]

Si se aumenta el coeficiente de transmisión de calor de la superficie de la pared a 8,3 W/m^2ºC, se comprueba que la capacidad de almacenamiento diurno aumenta, para una temperatura de fusión cercana a la media de la habitación. Sin embargo, si el rango de transición es muy amplio, o si la temperatura de fusión está lejos de la media de la habitación, incrementar el coeficiente de transmisión tiene un efecto mínimo.

Muro exterior con temperatura real

Una pared de un muro exterior, o en un techo adyacente al tejado está sometida a convección y radiación por el lado de la pared, y a la conducción, a través del aislamiento a la temperatura exterior. Mediante un análisis más detallado se puede concluir que la temperatura media de la pared no dependerá de su naturaleza, si no de la media entre las temperaturas interior y exterior. Por ello es de esperar que el máximo de almacenamiento diurno se de cuando la temperatura de fusión sea igual a la temperatura media estimada de la pared. [4]

El flujo periódico de calor en el muro exterior se calcula de igual manera que en el caso del muro interior, exceptuando que la superficie exterior se expone a un ciclo de temperatura a través de una resistencia térmica de 0,25 $W/m^2{}^oC$.

La energía total almacenada y liberada durante el día es una medida de la ganancia de almacenamiento, ya sea que la energía se disipe en la habitación o a través de la envolvente del edificio. Por ejemplo, si el calor solar almacenado se pierde a través del aislamiento, esto es beneficioso para los ocupantes porque sin dicho almacenamiento, la misma pérdida se habría dado a la habitación.

Los resultados de las simulaciones muestran que la pared exterior almacena ligeramente más energía que la pared interior, probablemente porque la pared exterior puede descargar más energía por la noche. Si la temperatura de fusión está lejos del valor óptimo, el muro exterior almacena ligeramente menos energía que el muro interior. La máxima energía almacenada ocurre nuevamente cuando la temperatura de fusión es aproximadamente la misma que la media de la pared. [4]

Con el análisis de los datos anteriores se puede afirmar que el máximo en el almacenamiento de calor durante el día se tiene cuando la temperatura de fusión del PCM es igual a la temperatura media del muro.

El valor óptimo de temperatura de fusión depende de la temperatura media de la habitación, que varía para cada edificio y para cada estación del año.

Para muros instalados en el exterior del edificio, el valor de la temperatura de fusión también dependerá de la temperatura exterior y de la resistencia térmica del muro.

3.3. La incorporación de PCM en la envolvente del edificio

Hace tan sólo unas décadas, los sistemas energéticos tradicionales en edificios se diseñaban e instalaban con un flujo unidireccional, esto es, del suministro a la demanda. Los sistemas clásicos de calefacción estaban basados en recursos abundantes y disponibles en todo momento, tales como el gas, electricidad o la calefacción

centralizada. No era necesario ningún sistema de control o almacenamiento. Simplemente abrir el grifo era suficiente para conseguir que el calor llegase al usuario. [6]

Con la introducción de sistemas de energía solar, el almacenamiento a corto y medio plazo fue introducido en el edificio para solventar el hecho de la intermitencia de la energía solar. Los sistemas de bomba de calor, equilibrando el enfriamiento en verano con la calefacción en invierno, necesitaban un almacenamiento estacional en grandes depósitos de agua o en instalaciones subterráneas. El desarrollo de tales sistemas se alentó a través de diversos proyectos a escala nacional y Europea. [7]

Al mismo tiempo, se desarrollaron tecnologías innovadoras de generación de calor tales como grandes centrales de energía solar, cogeneración con biomasa, generación de calor a partir de residuos industriales y el aprovechamiento de energía geotérmica. A menudo, los sistemas centralizados requieren unidades de apoyo dentro del edificio, alimentadas con electricidad. Tales sistemas pueden contrarrestar los beneficios medioambientales de la generación centralizada mediante recursos renovables. [8]

En cuanto a la demanda, se tomaron medidas para reducir el consumo de energía, a través de la mejora de los aislamientos, diseño inteligente de edificios, materiales de construcción innovadores y nuevos sistemas de calefacción, enfriamiento y ventilación, a menudo funcionando a niveles de temperatura bajos. [8]

Un importante efecto secundario de la reducción de la demanda energética para sistemas de calefacción es el aumento en la demanda de las necesidades de enfriamiento. Esto se debe a la mejora del aislamiento y a la minimización de pérdidas de calor a través de la envolvente del edificio. Aunque algunos arquitectos e ingenieros sostienen que el enfriamiento activo se puede evitar en edificios de baja demanda energética, los datos de consumo de energía indican que la demanda de energía para enfriamiento está subiendo. [9]

Muchas de las innovaciones citadas fueron apoyadas por la EPBD (*European Energy Performance of Buildings Directive*), y facilitados a través de proyectos nacionales y Europeos. Dado que el 40% de la energía se consume en edificios, la Unión Europea ha introducido una legislación para asegurar que se consume menos energía. Una parte clave de esta legislación es la EPBD, que requiere que todos los países de la UE mejoren la regulación de sus edificios e introduzcan esquemas de certificación de energía para edificios. La EPBD entró en vigor en 2002. [10]

En conjunto, el suministro de calor y de frío a edificios se ha convertido en un sistema cada vez más complejo, con energía de varias fuentes disponibles intermitentemente, y demandas de energía a diferentes niveles de temperatura y potencia. [11]

La optimización de un sistema tan complejo requiere de un sistema integrado de almacenamiento con control de flujo energético. Desde hace unos años, la medición de temperatura en sistemas de almacenamiento de calor y los sistemas de administración de energía en edificios, han estado a la orden del día en programas tanto nacionales como Europeos. Se han seguido diferentes conceptos y enfoques, como almacenamiento avanzado de agua, materiales de cambio de fase (PCM), y más recientemente, sistemas de almacenamiento termoquímico (TCS). Cada tecnología de almacenamiento tiene sus ventajas concretas en términos de tamaño, potencia, niveles de temperatura, eficiencia, ciclos de tiempo etc. [11]

Comparado con el almacenamiento tradicional de agua, los PCM y el TCS permiten un almacenamiento superior a 70 kWh/m^3 y por lo tanto, permiten también un volumen de almacenamiento reducido en comparación a los sistemas existentes en el estado del arte actual. [12]

Con respecto a los PCM, muchos materiales diferentes se han desarrollado y están disponibles comercialmente. Aún así, todavía se requiere investigación y desarrollo, en particular para incrementar la densidad de almacenamiento, estabilidad a largo plazo, reducir costes y para mejorar la operatividad dentro del conjunto del sistema de gestión de energía. [13]

Los materiales de cambio de fase son adecuados en particular para el almacenamiento a corto plazo y el equilibrado de energía.

En sistemas pasivos, las tecnologías de almacenamiento que pueden ser consideradas son el almacenamiento sensible y almacenamiento latente con PCM. El almacenamiento sensible tiene una densidad de energía demasiado baja, de manera que normalmente no se tiene en cuenta ya que no puede competir con los materiales aislantes. Los PCM han sido considerados previamente, pero debe resolverse el problema que se plantea al estar incluidos en la envolvente del edificio; la activación del PCM con la temperatura ambiental fría durante la noche depende totalmente de las condiciones climáticas. [14]

Los PCM almacenan calor en forma de calor latente, absorbiendo calor durante el cambio de fase, la fusión, y liberándolo durante la solidificación. El cambio de fase más usado es el líquido-sólido, porque su entalpía es elevada y la dificultad técnica que presenta es baja, (el cambio de fase líquido-gas presenta retos nuevos debido al elevado volumen). La ventaja principal de los PCM es que el calor se almacena y se libera a una temperatura constante, lo cual es de mayor importancia para aplicaciones en edificaciones. [15]

Un número muy elevado de publicaciones se han producido en los últimos años en referencia a los PCM usados como un sistema pasivo de ahorro de energía y para el confort térmico durante el verano. En general, la inercia térmica tiene un gran efecto en estas dos aplicaciones, pero también en el valor de potencia térmica de instalaciones de enfriamiento o calefacción. [15]

La concepción pasiva de los edificios requiere un buen conocimiento de la interacción entre el clima (temperatura, humedad, radiación solar, vientos, etc.), las cargas internas, la transparencia de la envolvente (esencialmente ventanas), y la cantidad de PCM insertado en los muros. Las variaciones dinámicas de las condiciones climáticas y de la carga interna tienen un gran impacto en la activación de los efectos inerciales. [15]

Un tema de interés que debe ser investigado es la investigación de un modelo de funcionamiento para PCM que conectase a la ISO13789. Ésta da una metodología para la evaluación del efecto de inercia de un muro constituido solo con calor sensible. Cuando se tiene en cuenta el PCM, es necesario considerar una cantidad de parámetros mucho mayor como: el calor latente, la temperatura de fusión, los datos meteorológicos, las cargas internas, etc. [15]

Tal trabajo es muy importante para el reconocimiento de los PCM para su uso en edificaciones, pero debido a la complejidad de las posibilidades de activación del PCM (radiación solar variable a lo largo del tiempo, modificación del coeficiente de convección, etc.), una gran cantidad de casos deben estudiarse y la optimización de posiciones, espesores, áreas, etc. deben especificarse para obtener una definición simplificada de la eficiencia. [15]

La limitación principal del uso de los materiales de cambio de fase es solventar problemas como la baja conductividad térmica, garantizar la carga y descarga de energía térmica y el coste, entre otros.

4. Descripción y construcción del dispositivo

El dispositivo sirve para la medida y la verificación de materiales secos que deben ser objeto de ensayos precisos.

El fundamento del método se basa en la aportación de un flujo térmico constante a dos probetas que rodean al foco caliente, para así obtener un gradiente térmico en dichas probetas en función de la potencia eléctrica aportada al foco caliente. El flujo térmico pasa a través de las probetas y se disipa por convección natural del aire en contacto con las superficies que no reciben calor.

Debido a su geometría y dimensiones el dispositivo esta construido para ensayar dos muestras cuadradas de 300 mm de lado y un espesor máximo de 30 mm. Para espesores superiores sería necesario adaptar el dispositivo a una sola probeta, colocando en el lado opuesto de la placa calefactora, material de aislamiento en lugar de otra probeta.

Los materiales que podemos ensayar en el dispositivo son los siguientes: [16]

- Materiales homogéneos y mezclas, granulosas compactas, que tengan un tamaño de grano de continuo y que no supere ¼ del espesor de las probetas.
- Materiales fibrosos con entramado uniforme y continuo, sin cámaras de aire superiores a 3 mm.
- Estructuras conteniendo alvéolos o celdillas repartidas de forma uniforme por el volumen de la probeta, y con diámetros inferiores a 3 mm.

Por tanto, el dispositivo consta de las siguientes partes que a continuación se describen con más detalles:

- Unidad calefactora.
- Carcasa aislante.
- La instrumentación de medida y registro.
- Fuente de alimentación.

4.1. Unidad calefactora

Su funcionamiento se basa en la aplicación de potencia eléctrica a una resistencia dispuesta lo más uniformemente posible a lo largo de una superficie de 0,09 m^2, envuelta a cada lado de una placa metálica para uniformizar el calor que produce la resistencia.

Consta de una resistencia realizada en hilo de kanthal de 1 mm de diámetro. Este material es un acero ferrítico Hierro-Cromo-Aluminio con pequeños porcentajes de Silicio y Manganeso, se rodea a cada lado por silicona conductora y cinta de Kapton en forma de manta de 1 mm de espesor aproximadamente, aislando eléctricamente la resistencia de las placas de aluminio que le envuelven a cada lado. La resistencia total del hilo de kanthal es de 13 ohmios.

Se colocan a ambos lados del conjunto unas planchas de aluminio de 3 mm de espesor y una superficie de 300 x 300 mm. Todo el conjunto forma un núcleo compacto y sin aire de 9 mm de espesor. La distancia entre espiras de la resistencia es de 10 mm aproximadamente. En las esquinas tiene orificios por donde centrar y fijar la unidad al dispositivo, y en un lateral los orificios están abiertos lateralmente para facilitar la apertura del dispositivo. Las dimensiones totales de la unidad calefactora son: 300 x 300 x 9 mm.

Fabricación

1) El primer paso es construir un molde con el cual poder construir y reproducir la resistencia cada vez que esta sufra algún daño.

2) Se dibuja en la madera el espacio que formará nuestra resistencia (300 x 300 mm) y la espiral que describirá el hilo de Kanthal, con separación de 10 mm entre espira y un margen lateral de 5 mm.

3) Se le corta a los clavos y los remaches la punta a fin de que una vez clavados en la madera no sobresalgan de esta más de tres milímetros.

4) Se clava en cada esquina de la espiral un clavo, y en el inicio y final del recorrido los dos remaches.

Fig. 4.1.1. Molde para la resistencia

5) Se enrolla un poco el Kanthal en el remache del inicio de la espiral y lo llevamos hasta el primer clavo, acogiéndolo con la cabeza del mismo. De este pasamos al siguiente, luego el siguiente y así hasta acabar con toda la espiral. Es importante estirar bien el Kanthal entre clavo y clavo y dejar al principio y final del recorrido suficiente hilo para realizar las conexiones.

6) El hilo de Kanthal sobrante al inicio y final de la resistencia, se trenza con la ayuda de un taladro; trenzando el hilo se aumenta la sección de la resistencia en las partes o zonas que queden en el exterior del dispositivo, reduciendo la temperatura en zonas exteriores y los accidentes por quemadura; además deben colocarse terminales de presión para mejorar el contacto eléctrico con la fuente de alimentación.

También se colocan para cada extremo trenzado cinco cilindros de diámetro 6 mm y longitud de 6 mm de alúmina (óxido de aluminio) para la curva, y un tubo también de alúmina del mismo diámetro y longitud de 60 mm para evitar el contacto eléctrico con las placas metálicas.

7) Una vez cortadas y mecanizadas las placas, se pintan las superficies en contacto con las probetas de color negro mate para conseguir una emisividad máxima.

8) Con las placas cortadas, se forra la parte interior de las mismas con cinta adhesiva Kapton. Con esto se consigue aislar eléctricamente las placas de aluminio de la resistencia. También se procede a colocar la resistencia entre las dos placas y aplicar una capa de 1 mm de espesor de silicona conductora, que facilita la transferencia de calor de la resistencia a las placas y también contribuye al aislamiento eléctrico.

9) Para la conexión de la unidad a la fuente de alimentación se usa un cable monofásico con tres hilos (positivo, negativo y neutro) con recubrimiento polimérico de 2 m de longitud e hilos de 1 mm de diámetro, con terminales de presión a un lado y conexiones banana en el otro.

10) Para la conexión de la unidad se monta un cable monofásico con tres hilos (positivo, negativo y neutro) con recubrimiento polimérico e hilos de 1 mm de longitud, con terminales de presión en un extremo y conexiones tipo banana en el otro.

Fig. 4.1.2. Cable de conexión fuente de alimentación-unidad calefactora

4.2. Carcasa aislante

Para la realización de los ensayos se requiere algún tipo de soporte para que el entorno influya lo menos posible en el conjunto de las medidas y en los resultados en general. Por ello, es necesaria la utilización de un material aislante térmico, para evitar contactos que modifiquen el flujo de calor (y para evitar posibles accidentes). Además con un material aislante es posible conseguir que el flujo de calor sea lo más uniaxial posible. Es decir que

el calor fluya en una sola dirección, que en el caso del presente proyecto es la dirección transversal a las probetas ensayadas.

El material escogido para desempeñar las funciones descritas arriba, es la espuma de poliuretano. Su baja densidad, fácil manipulación, buena capacidad de aislante térmico (conductividad térmica alrededor de 0.05 W/mºC) y bajo coste hacen que sea un material ideal para las exigencias del dispositivo.

La construcción del bloque aislante se ha llevado a cabo a partir de un bloque más grande del mismo material. Tomando como medidas de referencia las de los materiales a ensayar, se corta el bloque inicial para adecuarlo a dichas medidas, utilizando herramientas de corte simples. Las medidas exteriores entonces serían las de un bloque pseudo-cúbico de 410x450x280 mm aproximadamente.

A partir de un bloque de estas características se divide en dos partes iguales, a lo largo de un plano definido por la superficie de 410x450 mm. En cada mitad se practica un agujero central cuadrado de 250 mm de lado aproximadamente. De esta manera con la disposición final del dispositivo se contribuye a que el flujo de calor sea en la dirección deseada.

Después, en las caras interiores de cada mitad se agrandan ligeramente hasta un tamaño de 300 mm de lado los agujeros ya existentes. Esto se realiza en una profundidad de unos 30 mm, de manera que en la cavidad que queda se puedan alojar las probetas a ensayar y la placa calefactora.

La imagen muestra como queda la mitad de la carcasa aislante, siendo la otra mitad idéntica:

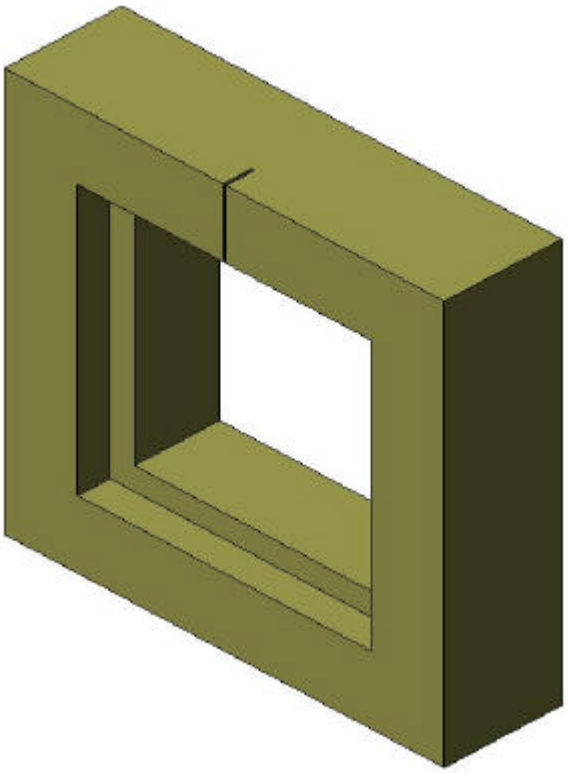


Fig. 4.2.1. Carcasa aislante (mitad)

4.3. Instrumentación de medida y registro

La instrumentación de medida se compone de varios aparatos: un ordenador, un conversor RS-485 a USB, el data logger y las sondas Pt-100 para medir la temperatura.

Las sondas de temperatura son el elemento principal ya que miden la temperatura en el punto donde se colocan y esos datos son los que se quieren obtener para realizar la curva T-history. El data logger se necesita para poder convertir la señal de las sondas en un

dato de temperatura, así como para funcionar de primer paso para poder transmitir esos datos a un ordenador. El conversor RS-485 a USB permite que los datos que llegan al data logger y éste procesa, se puedan registrar en tiempo real en un ordenador.

Sondas de temperatura

Se escoge una sonda de temperatura Pt-100 de precisión debido a que se quiere asegurar que no haya errores al medir el cambio de fase del PCM.

- Precisión: ±0.03ºC (elemento sensor), ±0.06ºC(sonda completa) a 0ºC
- Configuración a 3 hilos.
- Se recomienda una profundidad mínima de inmersión de 150mm
- Longitud del elemento sensor: los primeros 20mm
- Rango de funcionamiento: -50ºC a 250ºC
- Vaina en acero inoxidable AISI 316, diámetro 3 ó 6mm con 250mm de longitud.
- Cable: 2metros aislado con Teflón.

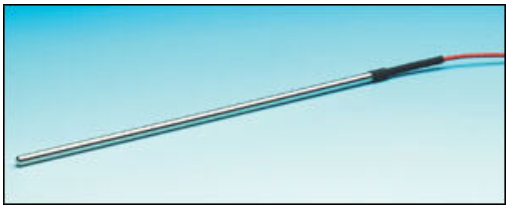


Fig. 4.3.1. Sonda de temperatura Pt-100

Data logger

Para el presente proyecto se necesita registrar la temperatura de varios puntos al mismo tiempo, por lo que es necesario un data logger con varios canales. El escogido es un módulo multifunción configurable de 12 entradas que puede leer señales analógicas.

- 12 entradas analógicas universales.
- Software de configuración.
- Software de registro y muestra en tiempo real de datos.
- Bus comunicación con posibilidad de seleccionar RS-232 o RS-485.

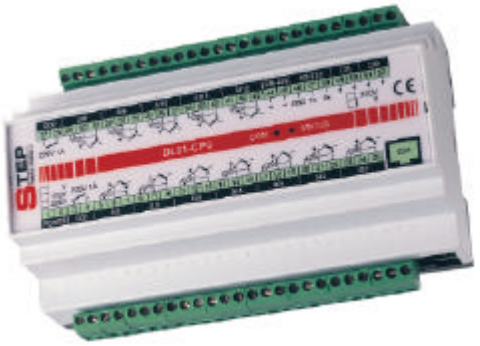


Fig. 4.3.2. Data logger

Conversor RS-485 a USB

Este elemento permite transmitir los datos procesados por el data logger a un ordenador, de manera que se pueden registrar y tratar posteriormente en una hoja de cálculo.

- Entrada USB universal.
- Salida a RS-485 a e hilos (positivo, negativo y neutro)
- Controladores para Windows
- Velocidad de comunicación de 300 a 115000 bauds.

Fig. 4.3.3. Conversor RS-485 a USB

4.4. Fuente de alimentación

La unidad calefactora debe alimentarse con una tensión e intensidad constante y graduable en corriente continua. Además dado que los experimentos pueden hacerse sin necesidad de vigilancia ya que el equipo recoge automáticamente los datos, es recomendable una fuente programable. Por ello se escoge una fuente PeakTech con las siguientes características:

- Salida de tensión 0-40V.
- Salida de corriente 0-10A.
- Potencia máxima 285 W
- Regulación de carga 300 mV.
- Regulación de línea 10 mV.
- Alimentación 100-240V, AC, 50-60 Hz.
- Programación de salida de tensión y corriente.

Fig. 4.4.1. Fuente de alimentación programable

5. Preparación de las muestras

El dispositivo fabricado está preparado para acoger muestras de un espesor de entre 10 mm como mínimo hasta un espesor máximo de 30 mm. Alternativamente se puede ensayar una sola muestra de hasta 60 mm en una configuración de muestra única.

Las probetas deben ser cuadradas, planas, paralelas al área total de la superficie y homogéneas en cuanto sus propiedades físicas (densidad, peso, etc). Deben tener una superficie de 300 x 300 mm como máximo, igual que la unidad calefactora y un mínimo de 200 x 200 mm para cubrir la zona de medición de 150 x 150 mm.

Las superficies de ensayo de las muestras deben ser aplanadas mediante métodos apropiados (siendo frecuente el lijado, cortado en un plano y el uso de herramientas adecuadas) de tal manera que el contacto entre las muestras y el equipo sea máximo.

Para dar como válido el ensayo, las probetas deben cumplir que la diferencia de densidad entre las probetas en todos los casos sea lo más similar posible, no pudiendo superar su desviación el 5% del valor medio. Además la diferencia entre el espesor de cada una de ellas y el espesor medio debe ser menor del 1% del espesor medio.

Las muestras o probetas para las que principalmente se construye el ensayo deben estar fabricadas de igual manera que los materiales de un muro de construcción, con lo cual estarán formadas por distintos materiales como son: ladrillo, hormigón y yeso.

5.1. Fabricación de una probeta de muestra

Las probetas que se pretenden ensayar son de materiales de construcción, y a efecto de disponer de un método de preparación y una referencia con la que comparar el resto de resultados, se decide fabricar una probeta de muestra.

El material escogido es cemento de construcción portland, sus características son las siguientes:

		Características del cemento	Especificaciones según norma e instrucción	Valores habituales
Características		Clinker (%)	95 mínimo	96
		Componente minoritario adicional (%)	5 máximo	4
	Químicas	Pérdida por calcinación, (PF) (%)	5 máximo	2
		Trióxido de azufre, (SO3) (%)	4 máximo	2.8
		Cloruro, (CI) (%)	0,1 máximo	0.01
		Residuo insoluble, (RI) (%)	5 máximo	1
	Físicas	Superficie especifica Blaine (cmz/g)	-----	3500
		Expansión le Chatelier (mm)	10 máximo	0
		Inicio fraguado (minutos)	60 mínimo	140
		Final fraguado (horas)	12 máximo	4
	Mecánicas	Compresión a 1 dia (N/mmz)	-----	20
		Compresión a 2 dias (N/mmz)	20 mínimo	30
		Compresión a 7 dias (N/mmz)	-----	45
		Compresión a 28 dias (N/mmz)	52.5 mínimo	58

Tabla. 5.1.1. Características del cemento utilizado

Para fabricar una probeta como las que se necesitan, se monta un molde de madera de 300 x 300 mm, con una profundidad suficiente para poder hacer probetas de hasta un mínimo de 30 mm de espesor. Puesto que se necesita medir la temperatura en el interior de la probeta, es necesario que ésta tenga un agujero que la atraviese aproximadamente

entre 150 y 180 mm y de 3 mm de diámetro. Esto es necesario para poder introducir una sonda como las descritas anteriormente.

Puesto que agujerear la probeta una vez solidificada sería difícil en exceso, se opta por solidificarla con el agujero ya practicado. A tal efecto se incrusta una varilla de plástico del diámetro especificado, envuelta a su vez en film transparente para poder sacarla una vez se solidifique la probeta. El montaje del molde queda como indica la figura.

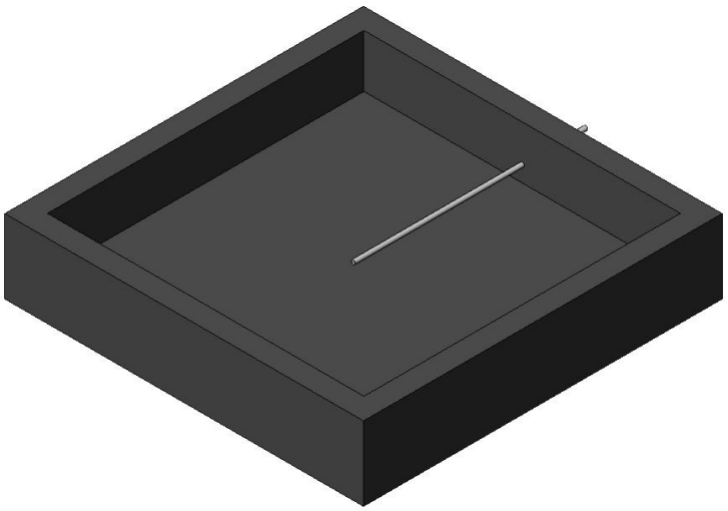


Fig. 5.1.1. Molde para la fabricación de probetas

De esta manera se pueden fabricar todas las probetas que se necesiten, sin necesidad de problemas para llegar al punto que se quiere medir con las sondas de temperatura.

A su vez, es necesario practicar un agujero en una de las superficies de la probeta. Éste queda enrasado a la superficie para poder medir la temperatura en una de las caras.

Finalmente, la probeta preparada para utilizar en un ensayo queda de la siguiente manera:

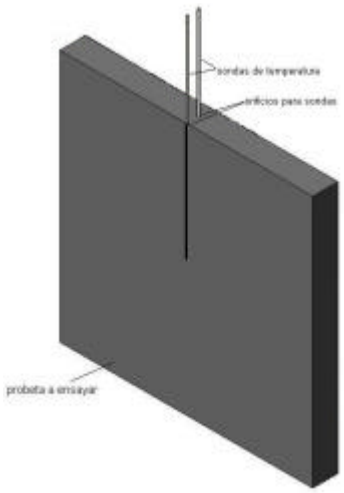


Fig. 5.1.2. Esquema probeta con sondas colocadas

Las probetas montadas en la carcasa aislante y la unidad calefactora quedan de la siguiente manera:

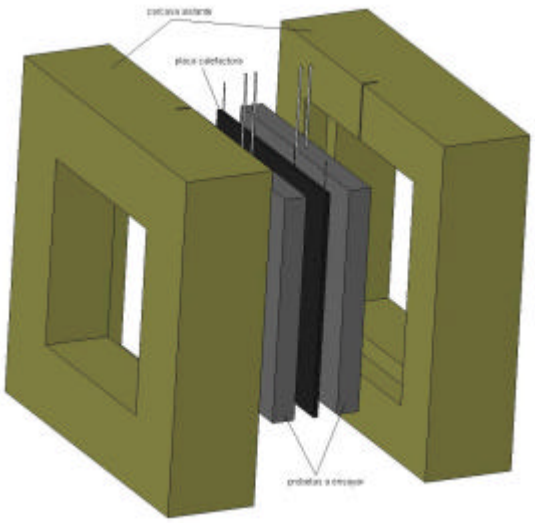


Fig. 5.1.3. Esquema desplegado del montaje del dispositivo T-history

5.1.1. Fabricación de una probeta de cemento

Para fabricar una probeta de cemento tal y como se ha descrito anteriormente, es necesario preparar una mezcla de cemento y agua y dejar que fragüe durante 28 días.

Para preparar la mezcla es necesario tener en cuenta las proporciones de los materiales que la componen: en este caso únicamente agua y cemento. Por cada parte de agua se añaden cuatro de cemento en polvo y se mezclan en una cubeta metálica.

Dicha mezcla se remueve con un mezclador de laboratorio en diferentes intervalos; en primer lugar se remueve lentamente a 60 revoluciones por minuto durante un minuto aproximadamente. Se para la máquina y se recoge el material pegado en las palas y se retoma el proceso de removido, haciéndolo progresivamente más rápido y más largo a intervalos: 90 revoluciones por minuto durante un minuto, a continuación durante un minuto y medio, etc.

Fig. 5.1.1.1. Mezclador de laboratorio

Este proceso se lleva a cabo hasta que se observa que la mezcla es lo suficientemente fluida y consistente

A continuación se llena el molde con la cantidad necesaria de mezcla y se con un aparato que produce vibraciones se eliminan las burbujas de aire que hayan quedado en el interior de la mezcla.

Finalmente la mezcla se deja secar durante 28 días en una cámara con temperatura y humedad controlada de manera que el cemento fragüe adecuadamente y el agua que contiene sobrante se evapore.

6. Funcionamiento y configuración del dispositivo T-history

El presente apartado se remite al apéndice X en el que se detalla de manera precisa cómo montar y desmontar el dispositivo T-history. Además se explica paso a paso la configuración del software de medida y control.

7. Procedimiento operatorio

Una vez se tienen las probetas preparadas tal y como se ha especificado anteriormente, se colocan las sondas de temperatura en los agujeros correspondientes, asegurando qué sondas están en cada posición para evitar fallos en los resultados.

Se comprueba el circuito y que las sondas funcionan correctamente encendiendo el ordenador con el que se recogen los datos y observando las lecturas.

Se colocan las probetas una en cada mitad de la carcasa, la unidad calefactora en medio, se unen las mitades y se aseguran mediante unos sargentos o algún método similar.

Se conectan los cables de salida de la fuente, en primer lugar a la unidad calefactora y después a la fuente de alimentación.

Se aplica corriente. En los ensayos realizados se utilizaron dos valores de voltaje: 20 y 12.5 V que permitían alcanzar y superar con creces el punto de fusión de los PCM de las probetas.

Mediante el sistema de recogida de datos se almacenan las temperaturas a medir en las probetas que se estén ensayando. Esto se lleva a cabo cada 30 segundos y se comprueba que la temperatura de las caras interiores es la misma.

Cuando se alcanza el equilibrio térmico a la temperatura deseada, se puede empezar el ensayo propiamente dicho, y se deja de suministrar calor a las probetas.

A partir de entonces, es cuando se consideran significativos los datos, ya que lo que se pretende observar es la curva temperatura-tiempo del enfriamiento de las dos probetas calentadas.

8. Experimentos y discusión de resultados

Para poder verificar las características y el comportamiento del dispositivo, es necesario llevar a cabo una serie de experimentos. El primer experimento que decide hacerse es una serie de ciclos de calentamiento y enfriamiento a dos probetas de referencia. El material de estas probetas es cemento portland.

El objetivo de estos experimentos es comprobar el correcto funcionamiento del montaje completo, comprobar que se alcanzan temperaturas de trabajo suficientemente elevadas (el PCM que se encuentra en las probetas a ensayar posteriormente tiene su punto de fusión en 25 ºC), también se pretende observar el enfriamiento y el calentamiento de una probeta de cemento estándar (sin PCM microencapsulado). Finalmente, se pretende comparar los resultados entre las dos probetas de cemento, que son iguales.

Los experimentos consisten en calentar las probetas desde la temperatura ambiente hasta el equilibrio térmico. El parámetro de control utilizado es la tensión aplicada a la unidad calefactora. Esta tensión toma valores de 15, 20, 22 y 25 V.

8.1. Configuración de los experimentos

A continuación se muestra detalladamente el esquema que siguen los experimentos llevados a cabo. Asimismo se especifica la notación que se utiliza para referirse a los diferentes elementos (probetas, sondas, etc.) en las explicaciones posteriores.

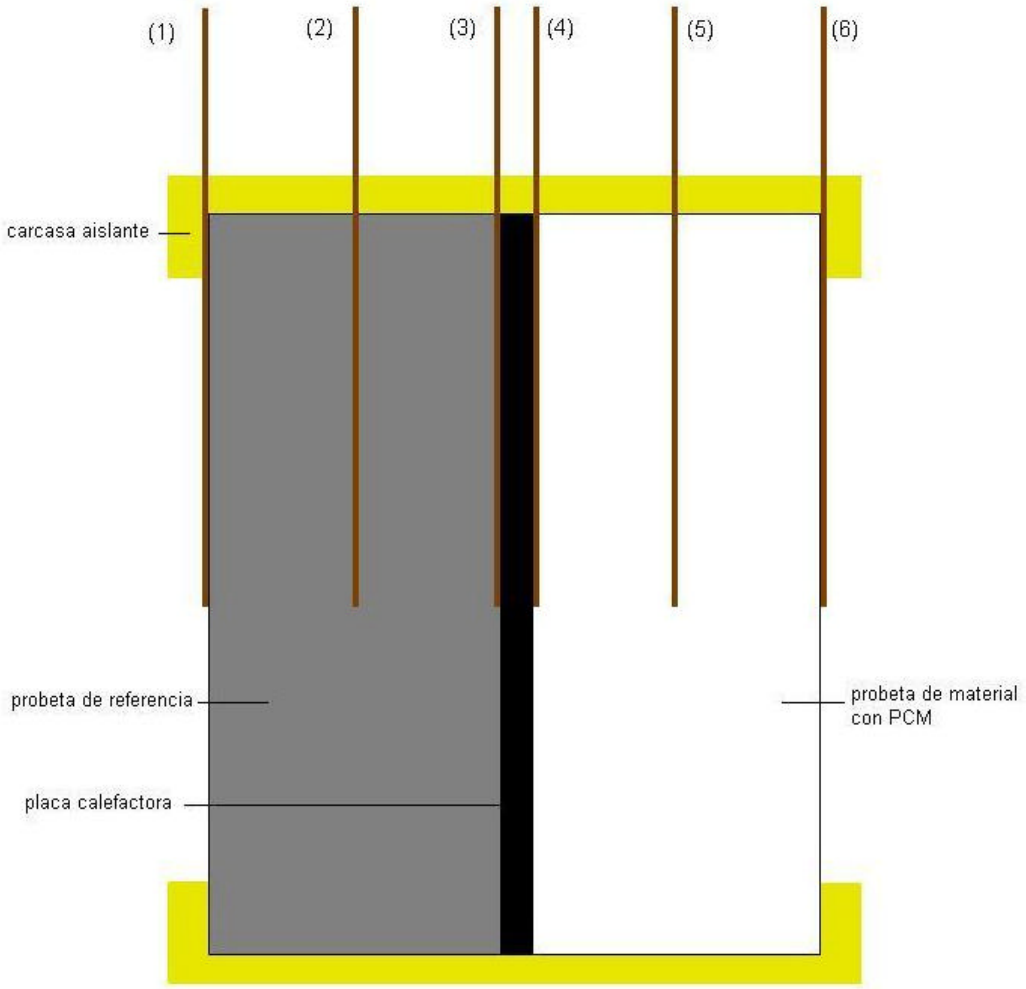


Fig. 8.1.1. Esquema colocación sondas

1. Sonda referente a la probeta de referencia: en la superficie en contacto con el aire.
2. Sonda referente a la probeta de referencia: en el interior de la probeta.
3. Sonda referente a la probeta de referencia: en la superficie en contacto con la placa calefactora.
4. Sonda referente a la probeta de material con PCM: en la superficie en contacto con la placa calefactora.
5. Sonda referente a la probeta de material con PCM: en el interior de la probeta.
6. Sonda referente a la probeta de material con PCM: en la superficie en contacto con el aire.

8.2. Experimento inicial con probetas de referencia

8.2.1. Configuración referencia-referencia, 15V

En el gráfico se observa un perfil de temperaturas acorde con lo esperado. Se tiene la temperatura más alta en contacto con la unidad calefactora, la temperatura intermedia corresponde a la sonda colocada en el interior de la probeta, y la temperatura más baja a la sonda colocada en la superficie en contacto con el aire.

Se puede ver que las curvas son paralelas entre sí, lo que quiere decir que se tiene un flujo de calor uniaxial, de dentro hacia fuera, es decir desde la cara más caliente hacia el exterior.

Por otro lado, se puede observar un fenómeno no tenido en cuenta hasta el momento y es la influencia de la temperatura ambiente en el experimento. Dado que el mismo se lleva a cabo durante un periodo de tiempo suficientemente largo, se puede observar el cambio de temperatura día/noche en la curva de temperatura ambiente. Asimismo, se observa una variación paralela en todas las curvas. A partir de las 20 horas de experimento puede verse que todas las curvas sufren un aumento progresivo, paralelo al de la curva de temperatura ambiente.

Este fenómeno se puede ver en todos los experimentos, y hace necesario que se controle la temperatura ambiente durante los mismos, a fin de evitar variaciones en los resultados debidas a las variaciones de temperatura ambiente.

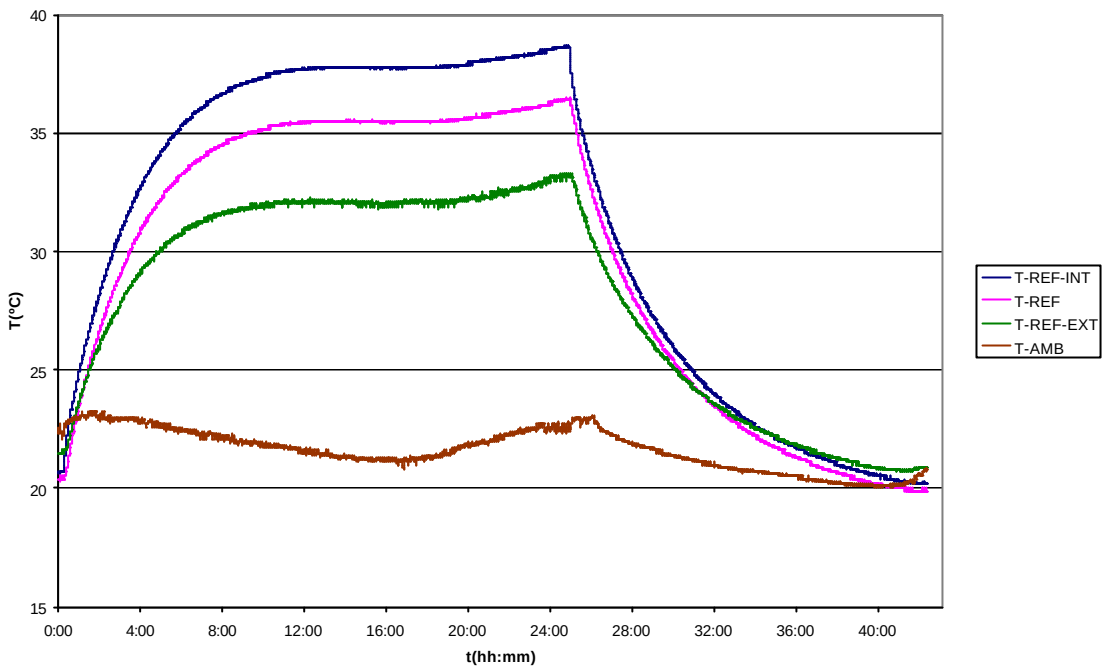


Fig. 8.2.1.1. T-history referencia, 15V

En la siguiente figura se pretende comprobar la precisión del dispositivo y de la configuración utilizada.

Se pueden ver dos pares de curvas que corresponden a ambas probetas usadas en el experimento. Las dos curvas superiores corresponden a las sondas en la superficie en contacto con la placa calefactora. En teoría estas dos curvas deberían superponerse, pero existe una diferencia de 0,3 ºC entre ambas. Esto puede deberse a un mal contacto entre las superficies, bien porque no esté bien cerrado el dispositivo o porque alguna de las superficies esté un poco sucia.

Esto lleva a considerar un cuidadoso montaje del dispositivo para intentar solucionar esta diferencia de temperaturas que no debería verse.

Las dos curvas intermedias corresponden a la temperatura exterior de las probetas, la que miden las sondas en contacto con el aire. En este par, se ve una diferencia mucho mayor entre las dos lecturas de temperatura, siendo la diferencia de más de 1,5 ºC entre

las dos curvas. En este caso la diferencia es demasiado importante para suponer que se trata de un fallo del dispositivo por mala colocación o montaje.

El motivo de esta diferencia se encuentra en las probetas ensayadas. En teoría tienen que tener las mismas dimensiones y la misma forma, pero después del ensayo se comprueba que una de ellas tiene unos 5 mm de espesor de media más que la otra. Esto lleva a la conclusión lógica que el salto de temperatura en una probeta y otra sea diferente, ya que su espesor también lo es y por tanto, al disiparse más calor en la probeta de más espesor, se tiene una temperatura más baja en su superficie exterior.

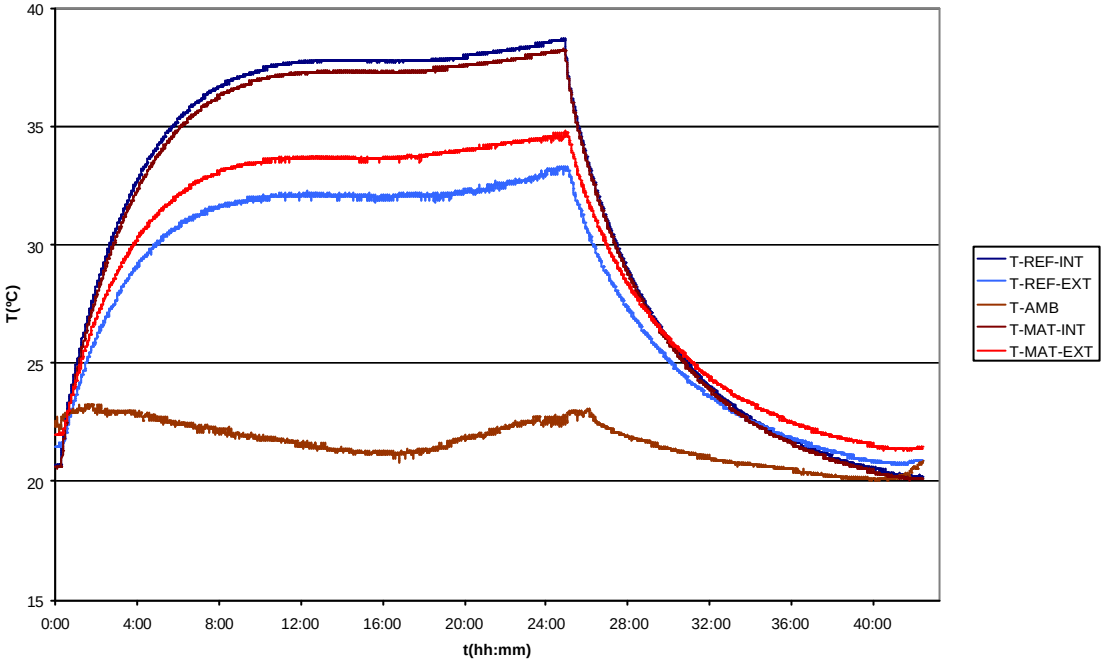


Fig. 8.2.1.2. Comparación probetas, 15V

8.2.2. Configuración referencia-referencia, 20V

Tal y como se ha especificado, se repite el mismo experimento aportando una potencia mayor, con un voltaje de 20 V.

En este caso, el experimento se lleva a cabo a lo largo de más de tres días. La finalidad de esta decisión es comprobar la variación de temperatura en las lecturas de las sondas según la variación de la temperatura ambiente por el ciclo día/noche.

Tal y como puede observarse, la variación según los ciclos día/noche es evidente en la zona de equilibrio térmico. Con esto se constata que es necesario controlar la temperatura ambiente.

Asimismo, se ve que las curvas siguen el mismo patrón del experimento a 15 V, llegando a una temperatura más elevada que antes debido a que se proporciona más energía a la unidad calefactora. Esto también provoca que la diferencia de temperatura entre cada sonda sea mayor.

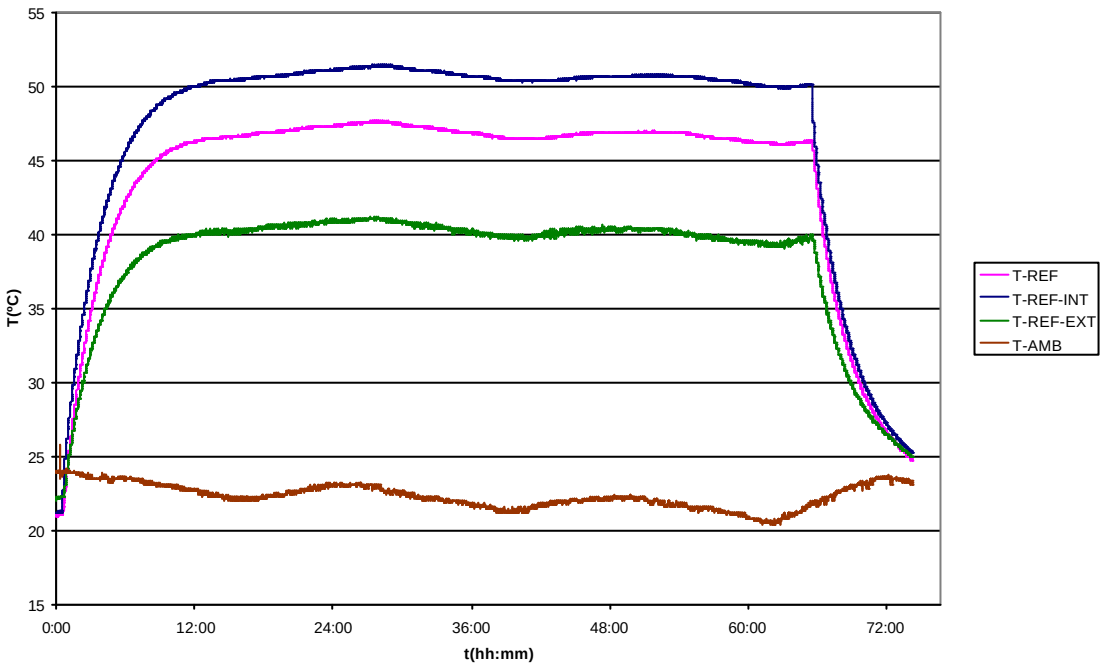


Fig. 8.2.2.1. T-history referencia, 25V

En la comparativa entre las dos probetas nuevamente se observa un resultado similar al del experimento a 15 V. Se tiene una pequeña diferencia entre las temperaturas

correspondientes a las sondas en la superficie en contacto con la unidad calefactora, que en este caso es ligeramente mayor debido a que la energía suministrada es mayor.

Para las curvas de las sondas en contacto con el aire, se ve un salto demasiado elevado para pensar en que es a causa de la resistencia de contacto y que se debe a la diferencia de espesores entre las dos probetas ensayadas. Nuevamente, la diferencia es mayor con respecto a la que se observa en el experimento a 15 V.

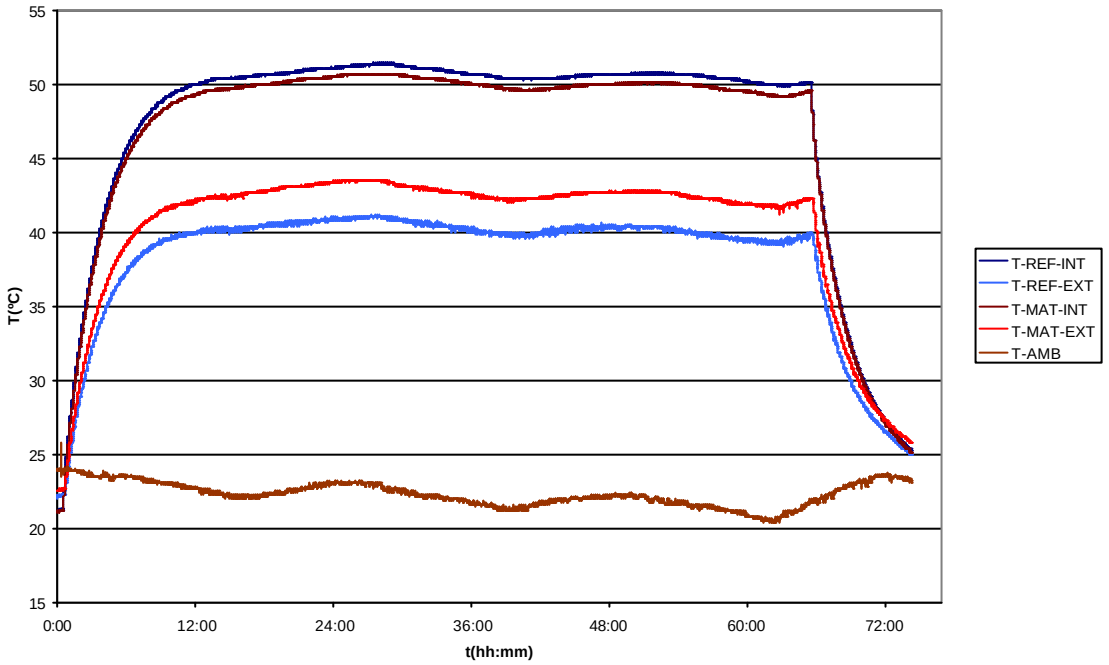


Fig. 8.2.2.2. Comparación probetas 20V

8.2.3. Configuración referencia-referencia, 22 y 25V

En los experimentos variando la tensión a 22 y 25 V, los resultados que se observan son totalmente análogos a los de los experimentos anteriores, si bien estos dos experimentos se han realizado en menos tiempo que los anteriores.

Se tiene el mismo paralelismo entre curvas y también se observa una cierta influencia de la temperatura ambiente sobre las lecturas de las sondas.

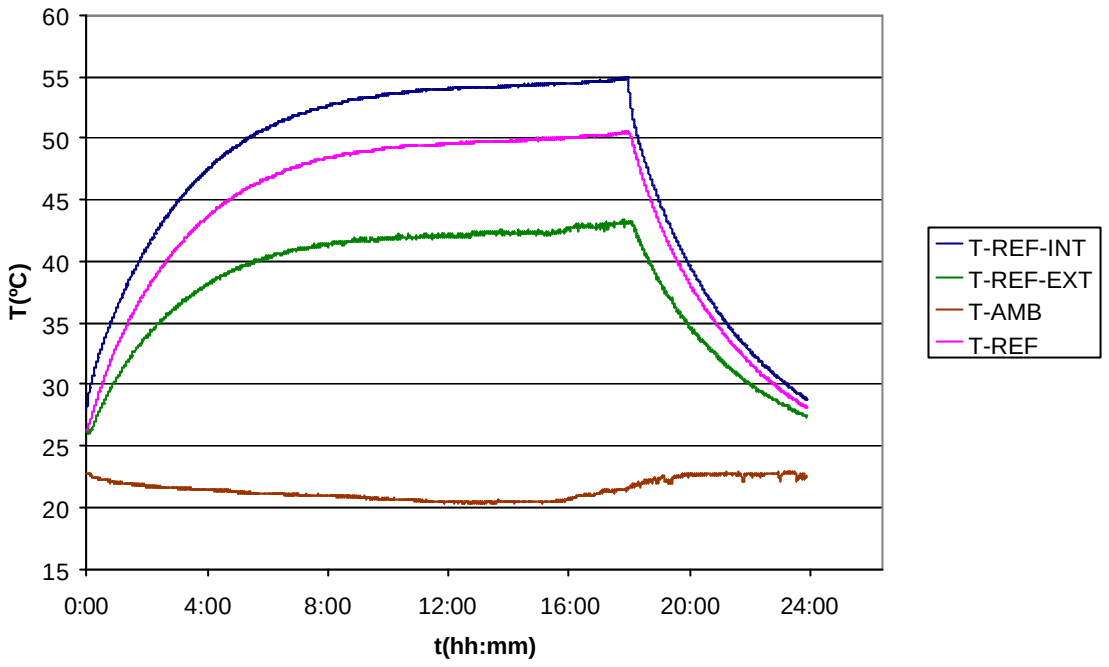


Fig. 8.2.3.1. T-history referencia, 22V

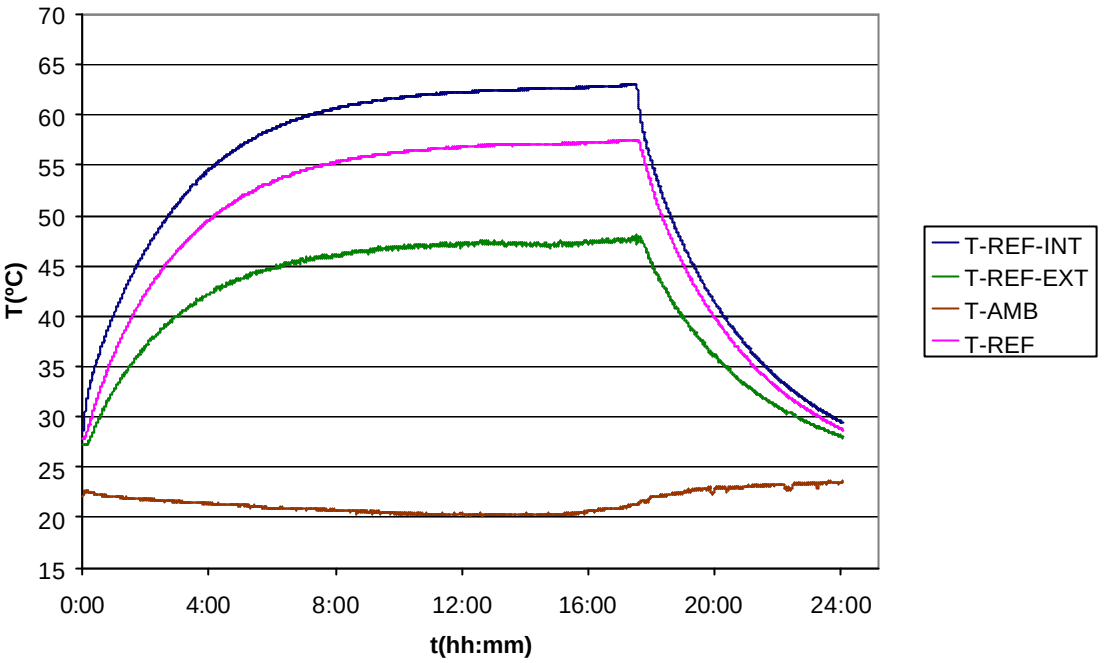


Fig. 8.2.3.2. T-history referencia, 25V

De forma similar, la comparación entre ambas probetas da resultados equivalentes. Se tiene una pequeña diferencia entre lecturas de las sondas que están en la superficie en contacto con la unidad calefactora. Y esta diferencia es ligeramente más grande que en los dos casos anteriores.

En el caso de las sondas en la superficie en contacto con el aire, se observa una diferencia mayor entre las dos probetas debido a que el espesor de las mismas difiere en unos 5 mm.

Como conclusión de los experimentos se puede decir que el dispositivo a priori cumple con la función esperada.

El tiempo de estabilización térmica de las probetas se puede situar en aproximadamente 16 horas. A partir de ese punto, la temperatura máxima alcanzada empieza a seguir el mismo patrón de la temperatura ambiente.

Se observa que las curvas son paralelas hasta cierto punto del enfriamiento, lo que quiere decir que no se dan condiciones de flujo uniaxial durante todo el experimento.

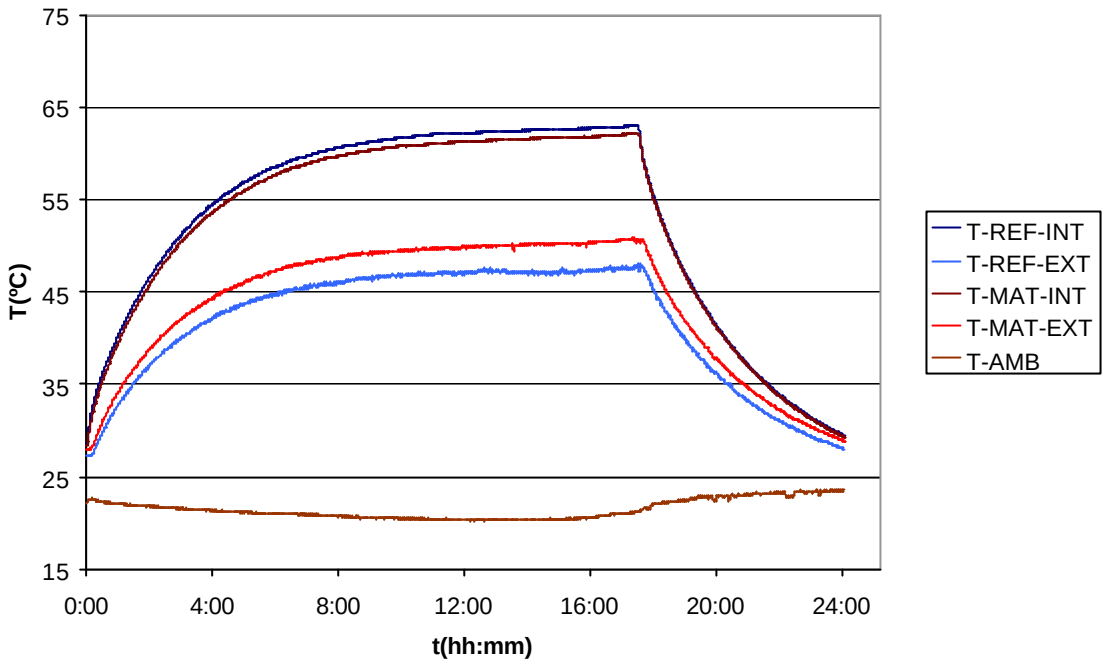


Fig. 8.2.3.3. Comparación probetas, 22V

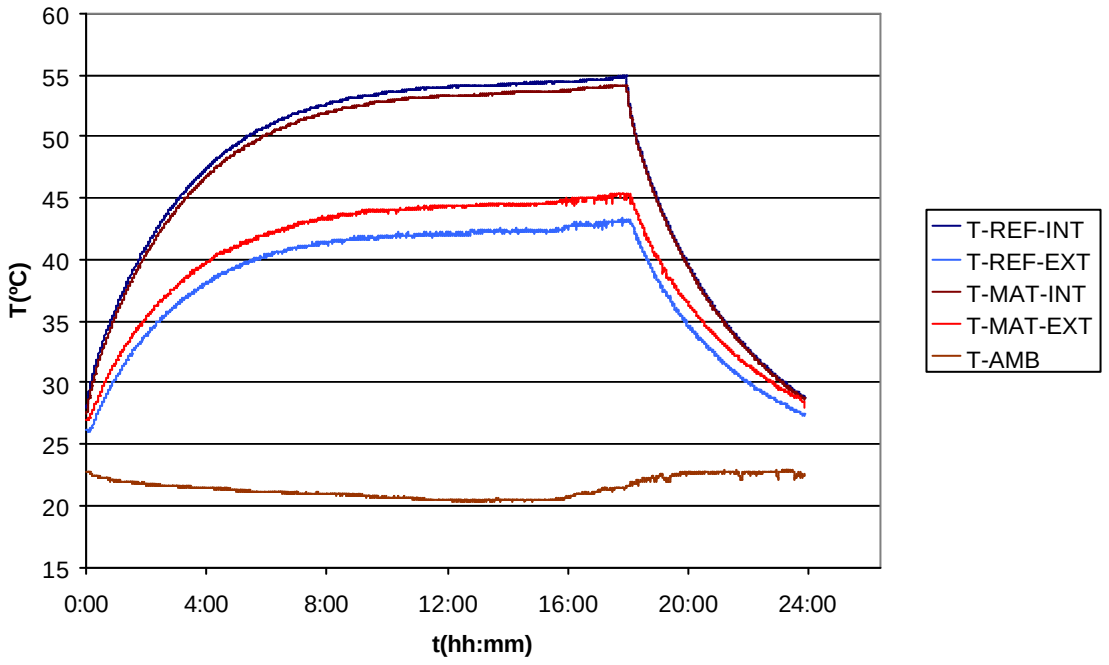


Fig. 8.2.3.4. Comparación probetas, 25V

8.3. Experimentos con probetas de yeso

En esta serie de experimentos se trata de probar la función principal del dispositivo T-history, que es observar la diferencia entre una probeta de un cierto material y otra probeta del mismo material pero con un cierto porcentaje de PCM microencapsulado. En definitiva, se quiere ver el cambio de fase del PCM que se encuentra en la probeta ensayada.

En estos experimentos se ensayan diferentes probetas, el material base es el mismo para todas y es yeso. Se tiene una probeta de referencia de yeso que es la que se usa para comparar el efecto del PCM de las otras. Estas otras probetas tienen el mismo material base que la de referencia, pero tienen un porcentaje en masa de PCM microencapsulado. Hay tres probetas con un 5%, 10% y 15% de PCM en su interior.

En estos experimentos se configurará el dispositivo de manera que a un lado de la unidad calefactora haya una probeta con PCM y al otro lado la probeta de referencia. Se sigue el mismo procedimiento establecido en los experimentos iniciales, de manera que se calienta el conjunto dando siempre una tensión de 20 V, dejando llegar al equilibrio térmico y una vez en ese punto se apaga la fuente de alimentación, dejando así de transmitir calor a las probetas.

En estos experimentos, además, se ha controlado la temperatura ambiente de la habitación donde se llevan a cabo los mismos para evitar variaciones en los resultados. Los experimentos se hacen en una habitación climatizada con aire acondicionado para conseguir una temperatura estable durante todo el tiempo que dura el experimento.

De esta manera se evitan las anteriormente mencionadas variaciones que son indeseadas, y además se resuelve un problema surgido durante la experimentación: en

los primeros experimentos el PCM no fundía hasta llegar a la temperatura ambiente. Esto se debe a que los experimentos se hicieron en verano y el punto de fusión del PCM es de 25 ºC. De esta manera resultaba imposible poder ver la fusión del PCM y por lo tanto se hizo necesario asegurar una cierta temperatura constante, que además fuera inferior a 25 ºC. Se escogió mantener la temperatura ambiente en 20 ºC.

8.3.1. Configuración referencia-PCM 5%

En el gráfico se han representado las curvas referentes a las sondas introducidas en la parte intermedia de las probetas, la curva roja se refiere a la probeta con PCM y la azul a la de referencia.

Se puede observar claramente una diferencia entre las dos curvas que corresponde al cambio de fase del PCM. Éste se da a partir de aproximadamente 27,5 ºC y le confiere una inercia térmica a la probeta que hace que tarde en enfriarse aproximadamente 30 minutos más.

También se observa una diferencia entre el máximo de temperatura de las dos curvas, esto se debe a que el PCM está homogéneamente mezclado con el yeso y se modifican así las propiedades del material compuesto respecto del material de referencia. Al contener PCM, la conductividad térmica del compuesto disminuye.

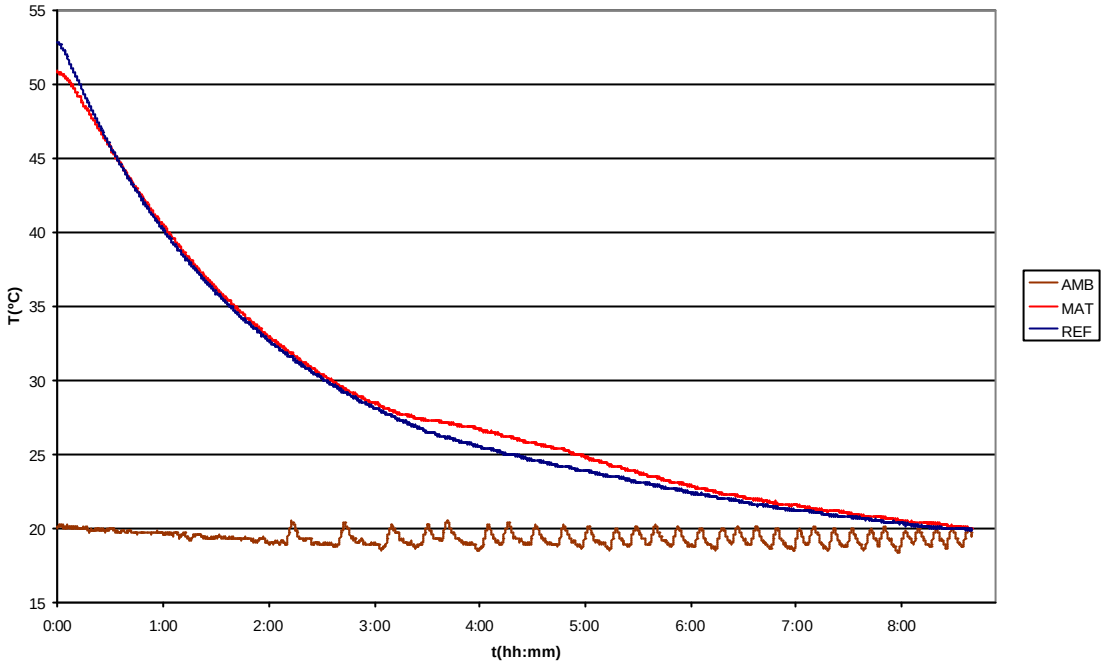


Fig. 8.3.1.1. Comparación referencia-PCM 5%

En el siguiente gráfico se muestra las lecturas de las sondas correspondientes a la probeta de muestra. En este caso, las probetas son de 20 mm de espesor, por lo que resulta imposible colocar una sonda en la superficie en contacto con la unidad calefactora. Por ello solo se tiene la lectura de las otras dos.

En este caso no se observa una correlación entre las dos curvas que corresponden a la misma probeta, pero sí se observa que las curvas se cruzan, lo que indica que no se tiene en todo momento un flujo uniaxial.

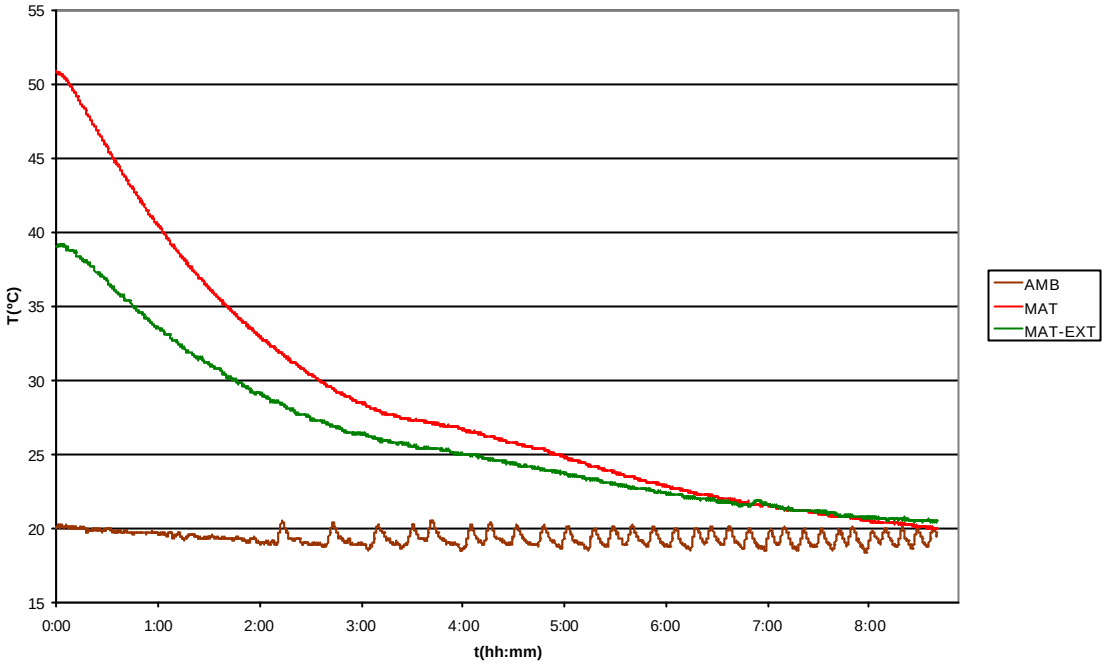


Fig. 8.3.1.2. Probeta de muestra con PCM 5%

8.3.2. Configuración referencia-PCM 10%

En este caso se observa un comportamiento similar al anterior. Se puede ver que la temperatura máxima alcanzada ha disminuido. Esto indica que el comportamiento térmico del conjunto cambia según cambia el contenido de PCM de la probeta de con material microencapsulado.

Al igual que anteriormente, se puede ver claramente el cambio de fase del PCM en la probeta. La curva correspondiente sufre un salto cuando se llega a los 25 ºC y la fusión empieza. De esta manera la probeta obtiene una inercia térmica de 30 minutos.

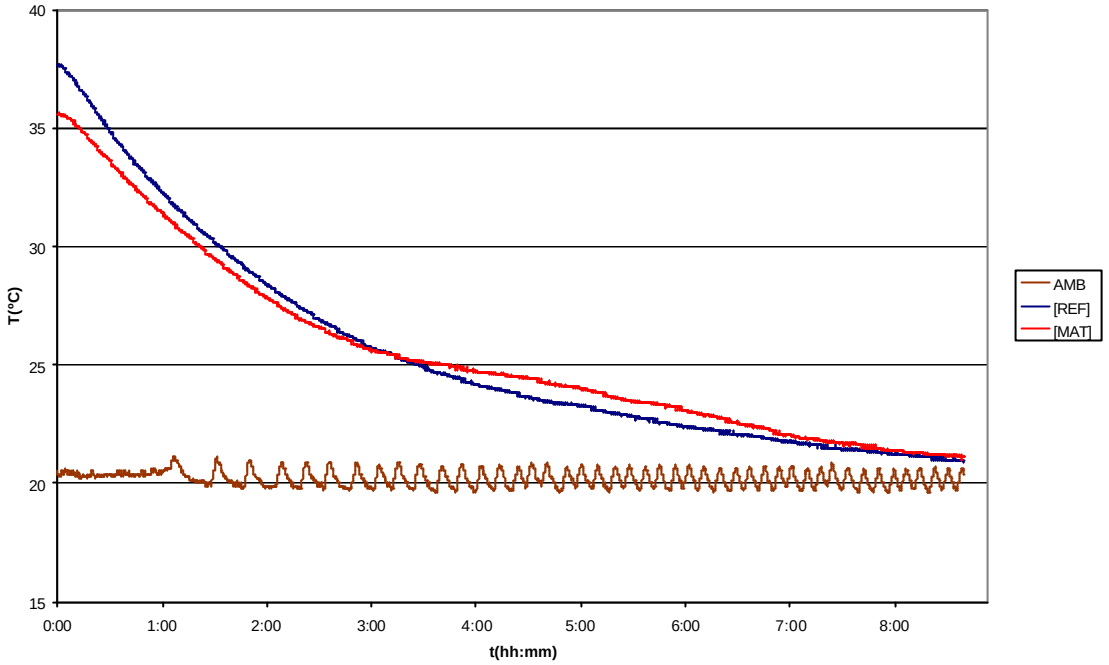


Fig. 8.3.2.1. Comparación referencia-PCM 10%

Al observar el comportamiento de la probeta de muestra según lo que muestra el gráfico, es evidente que no hay un flujo uniaxial, ya que la temperatura de la superficie en contacto con el aire no está en todo momento más fría que el interior de la probeta.

Además no se observa un comportamiento similar en las dos sondas, lo que indica que el flujo de calor no es perpendicular a la superficie de la probeta.

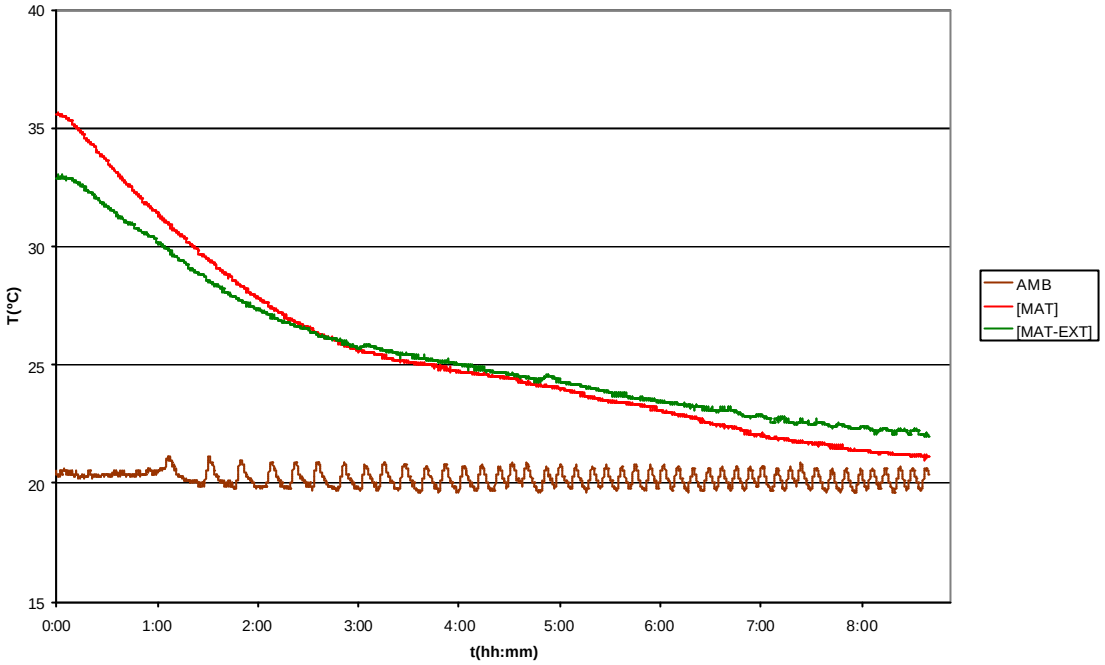


Fig. 8.3.2.2. Probeta de muestra con PCM 10%

8.3.3. Configuración referencia-PCM 15%

En este caso, el experimento es muy similar a los dos casos anteriores, pero se observa un cambio de fase de mayor duración.

El cambio de fase empieza aproximadamente al alcanzar los 27 ºC y el PCM empieza su descarga, más lentamente que el material en el que está microencapsulado. Dicho material compuesto tiene una inercia térmica de 2 horas aproximadamente, respecto del material no compuesto.

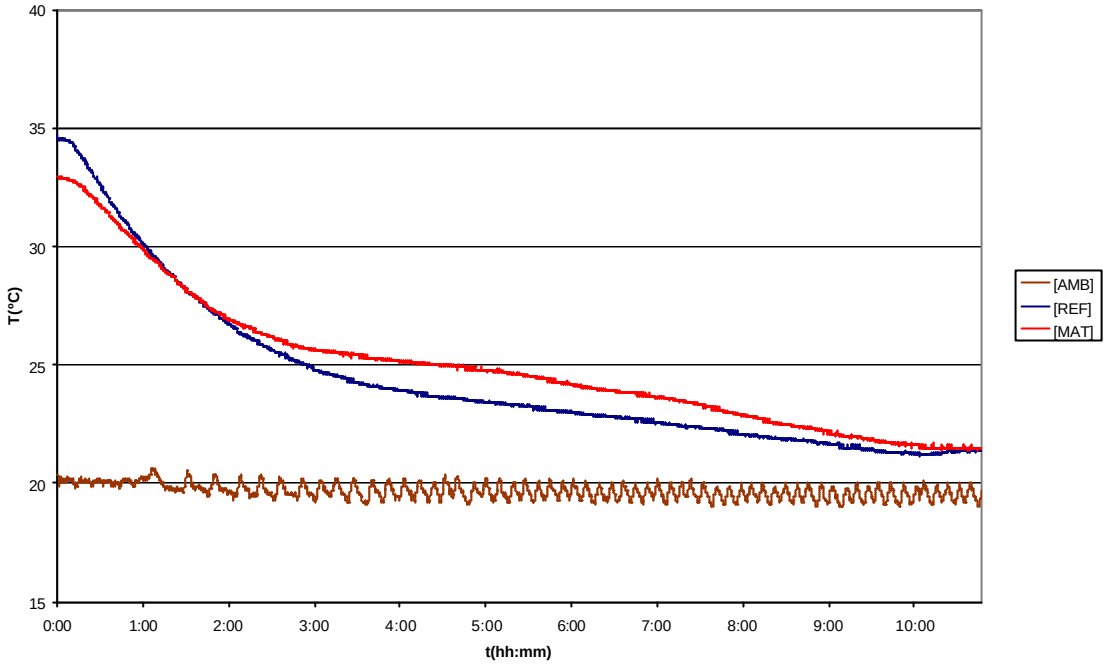


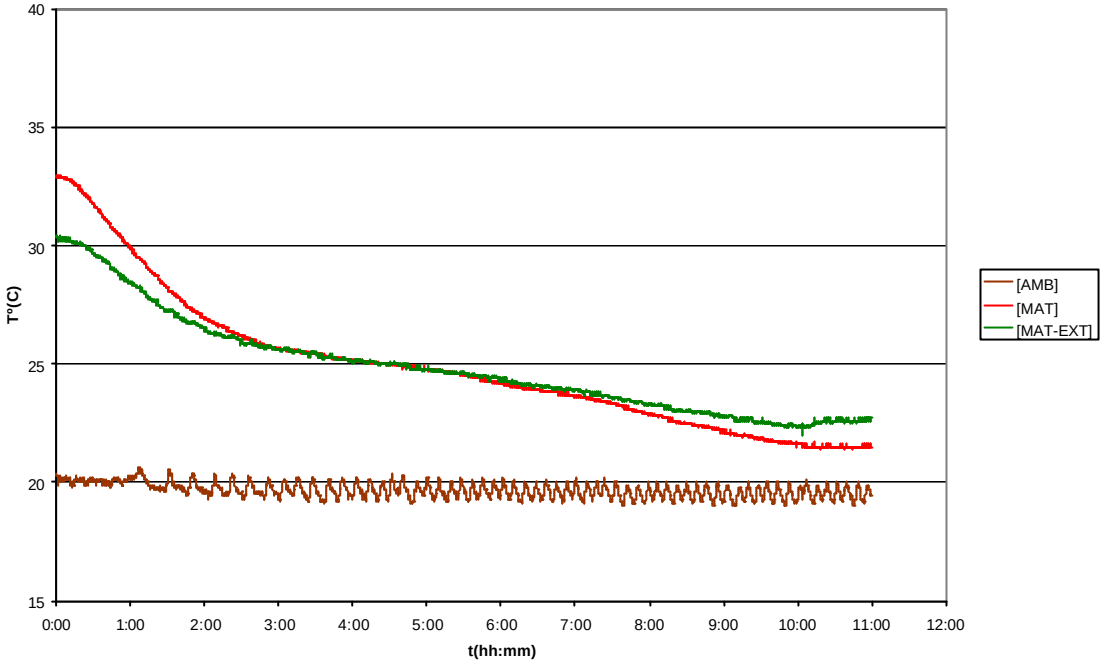
Fig. 8.3.3.1. Comparación referencia-PCM 15%

El gráfico para la probeta con una cantidad del 15% de PCM muestra un resultado similar a la probeta con 10%. Se cruzan las curvas de temperatura, y por ello se puede decir que el flujo de calor no va en dirección a la superficie en contacto con el aire. Esto se da a partir del momento en que empieza el cambio de fase del PCM.

De los resultados anteriores, el dato más importante es que las curvas para una misma probeta con PCM no son paralelas y se cruzan en cierto momento durante el enfriamiento, normalmente a partir del cambio de fase del PCM. Este efecto no es deseable, ya que las condiciones del ensayo T-history requieren que el flujo de calor sea uniaxial.

A pesar de ello, pueden observarse claramente los cambios de fase en los casos, y determinar su duración aproximada. Al aumentar la cantidad de PCM esta duración

aumenta, así como la diferencia entre la curva de la probeta con PCM y la curva de la probeta sin PCM.



Probeta de muestra con PCM 15%

8.4. Experimentos con probetas de cemento

Para comprobar la validez del dispositivo T-history se decide hacer experimentos con dos materiales diferentes. Anteriormente se han estudiado los experimentos con probetas de yeso, en este caso, las probetas serán de cemento.

Nuevamente se pretende observar el cambio de fase del PCM de una probeta, y la diferencia en la curva T-history con respecto a la probeta sin PCM. De manera análoga a los experimentos anteriores, se usan tres probetas con contenidos de PCM diferentes, 5%, 10% y 15% en masa, y una probeta de referencia sin PCM.

Los experimentos se llevan a cabo con una configuración de referencia y probeta con PCM a cada lado de la unidad calefactora y en este caso se aplica 12,5 V de tensión a la misma.

Las condiciones de ambiente y tiempo son las mismas, controlando la temperatura ambiente mediante aire acondicionado a 20 ºC y calentando hasta alcanzar el equilibrio térmico y dejando enfriar después súbitamente.

8.4.1. Configuración referencia-PCM 5%

En el gráfico se representan las curvas referentes a las sondas introducidas en la parte intermedia de las probetas. La curva roja se refiere a la probeta con PCM en su interior y la azul a la probeta de referencia.

Al observar el gráfico, es evidente la diferencia entre las curvas de las dos probetas. El cambio de fase del PCM empieza a los 25,5 ºC. La diferencia máxima de temperaturas es de 0.7 ºC. Gracias a la descarga del PCM, la probeta de material compuesto obtiene una inercia térmica de manera que tarda en enfriarse 1 hora más que la probeta de cemento.

Al igual que en el caso del yeso, se observan diferencia entre el máximo de temperaturas alcanzado. Se ve que la curva de la probeta con PCM tiene un máximo más bajo.

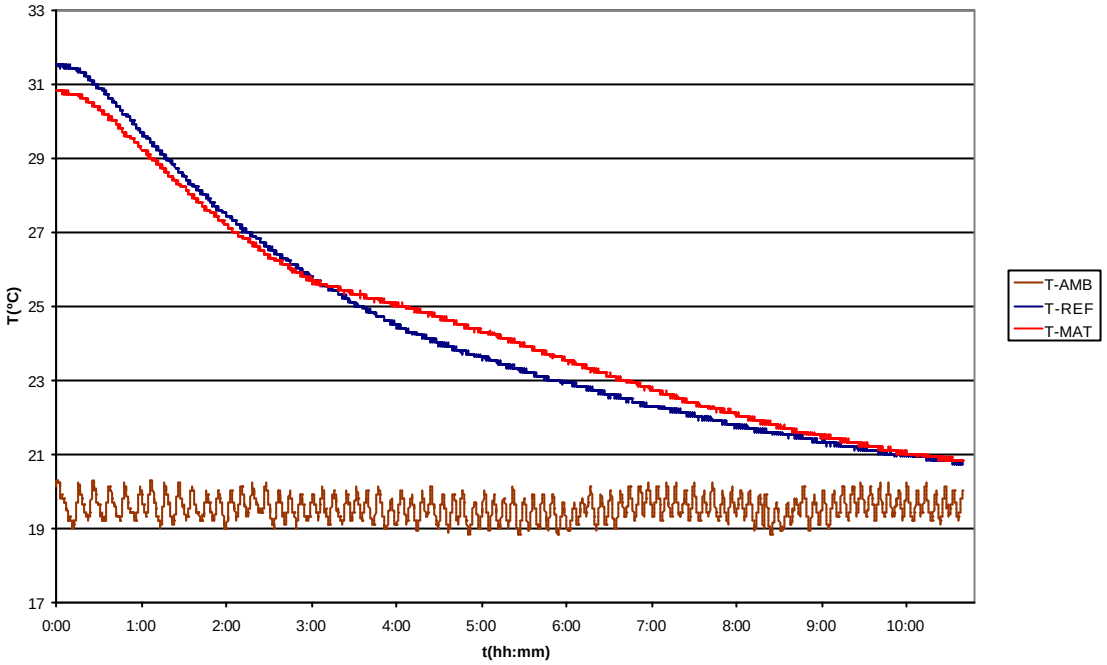


Fig. 8.4.1.1. Comparación referencia-PCM 5%

En la gráfica se representan los registros de las sondas correspondientes a la probeta de muestra con PCM. A diferencia de las probetas de yeso, las de cemento tienen un espesor suficiente para colocar las sondas correspondientes a la superficie en contacto con la unidad calefactora.

Al observar las curvas, se puede deducir claramente que el flujo de calor en ningún caso es uniaxial a lo largo del experimento, ya que inicialmente la superficie en contacto con la unidad calefactora está más caliente que el resto, pero se enfría mucho más rápido que las otras dos superficies.

El interior de la probeta se mantiene en casi todo momento más caliente que el resto. Esto se debe a que el PCM hace que el enfriamiento en el interior de la probeta sea más lento y las otras dos superficies se ven menos afectadas por el contenido del mismo.

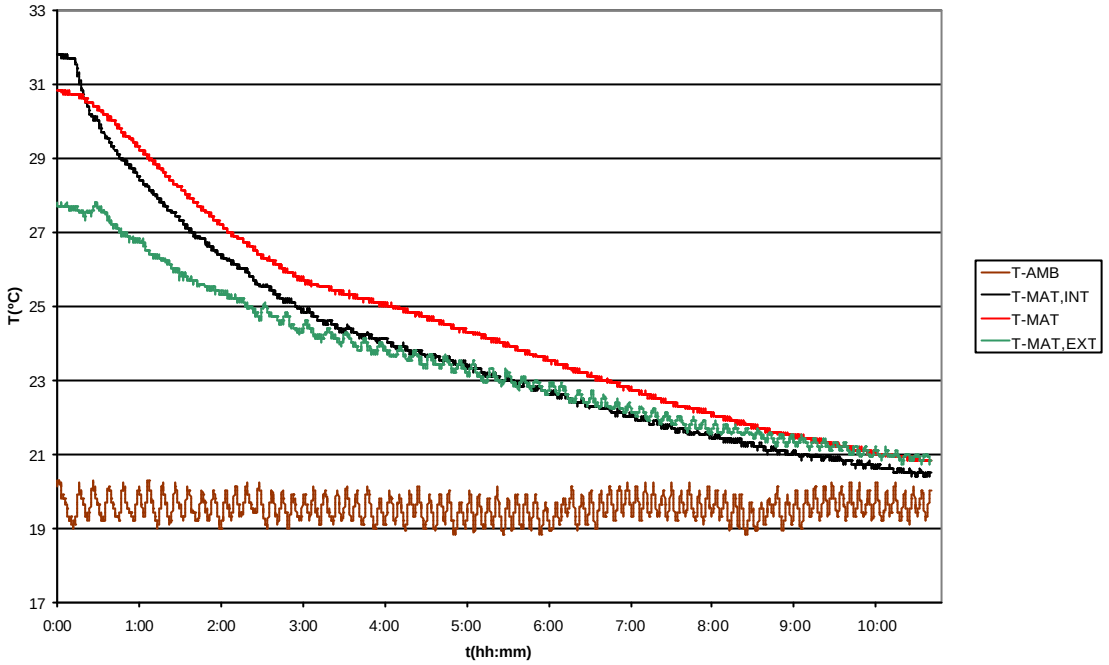


Fig. 8.4.1.2. Probeta de muestra con PCM 5%

8.4.2. Configuración referencia-PCM 10%

En este caso se observa un comportamiento muy similar a los anteriores. Se refleja claramente el cambio de fase, que empieza a partir de 26,5 ºC. La diferencia máxima que se da durante la solidificación del PCM es de 1,2 ºC. La inercia térmica que se obtiene es de casi 2 horas.

En cuanto al máximo de temperaturas alcanzado, no se puede decir que haya una diferencia apreciable respecto del resto de casos En todos los experimentos se observa que las temperaturas máximas alcanzadas no son iguales, y en este caso no es así. Esto podría deberse a un error de lectura o de colocación en alguna de las dos sondas.

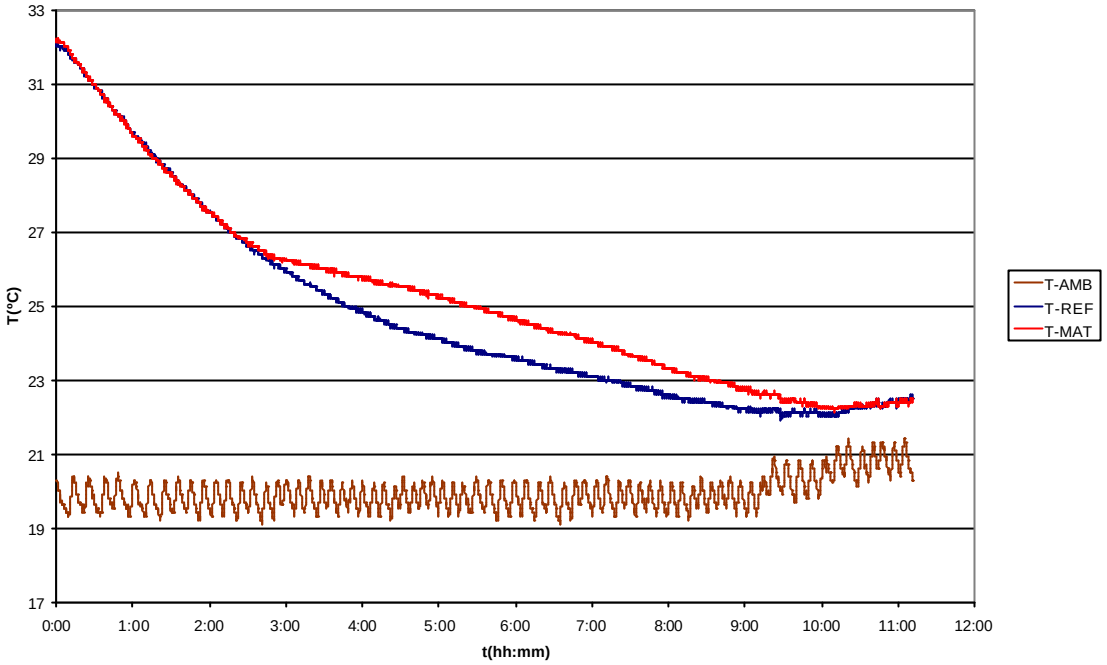


Fig. 8.4.2.1. Comparación referencia-PCM 10%

Al observar el comportamiento de la probeta con PCM en su interior, se ve resultado similar al caso anterior. La superficie en contacto con la unidad calefactora se enfría muy rápidamente, y la superficie en contacto con el aire está más fría al iniciar el enfriamiento. Esto hace que, de nuevo, el interior de la probeta esté más caliente durante el experimento.

Por ello, se puede decir que el flujo no es uniaxial y perpendicular a la probeta, ya que las curvas se cruzan y no son paralelas en ningún momento del experimento.

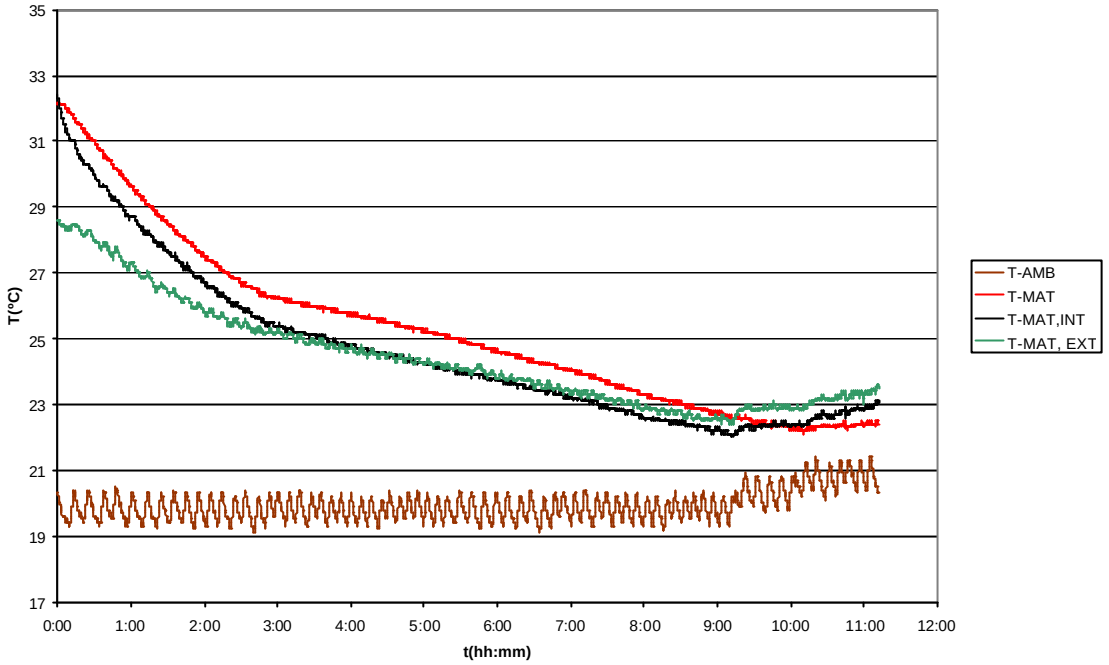


Fig. 8.4.2.2. Probeta de muestra con PCM 10%

8.4.3. Configuración referencia-PCM 15%

Finalmente, en el experimento con la probeta con PCM al 15%, se observa un resultado similar a los anteriores. Las curvas que han resultado permiten distinguir el cambio de fase del PCM sin problemas. Éste empieza en 26,5 ºC, la diferencia entre temperaturas es de 1,5 ºC, y la inercia de 3 horas aproximadamente. Además, las temperaturas máximas alcanzadas difieren en 0,5 ºC y no son inferiores a las alcanzadas en los experimentos anteriores.

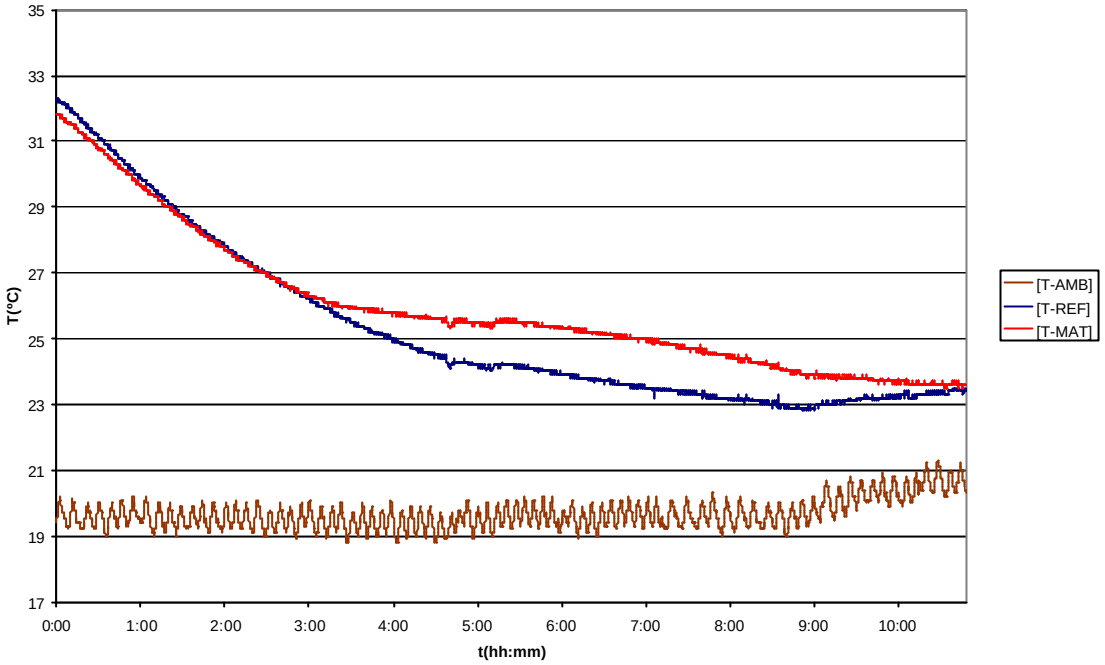


Fig. 8.4.3.1. Comparación referencia-PCM 15%

El gráfico referente a la probeta con 15% de PCM muestra un resultado análogo a los dos anteriores. La superficie en contacto con la unidad calefactora se enfría mucho más rápido que las otras, y el interior de la probeta está más caliente, excepto al final del experimento, debido al incremento de temperatura ambiente.

Las curvas se cruzan también en este caso, de manera que no se puede asegurar que el flujo sea uniaxial, al igual que en los demás casos.

De los resultados anteriores, se puede concluir que el flujo de calor durante los experimentos no es uniaxial. Esto no cumple con los requisitos del ensayo T-history.

La conductividad de las probetas con PCM no puede deducirse de los resultados. En los ensayos no se ve una correlación entre la diferencia de temperaturas máximas y la cantidad de PCM de las probetas.

También se observa que la temperatura de la superficie en contacto con la unidad calefactora disminuye mucho más rápidamente que las otras. Esto puede deberse a que están en contacto con la unidad calefactora, que es metálica y se enfría mucho más rápido que las probetas. De esta manera se tendría que la placa calefactora actúa como un foco frío al apagar la fuente de alimentación.

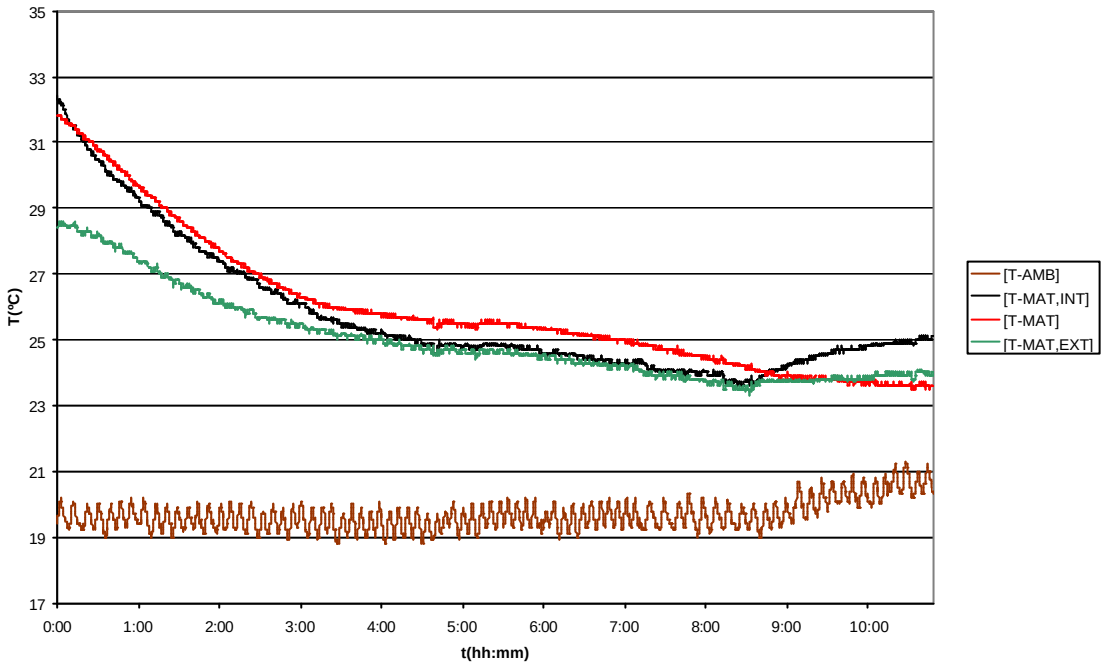


Fig. 8.4.3.1. Probeta de muestra con PCM 15%

8.5. Experimentos adicionales

Para complementar los experimentos anteriores que hacen hincapié en el material que se usa, se llevan a cabo ensayos cambiando la configuración. En este caso, tan solo se usa una probeta, en concreto de cemento con PCM.

Se pretende comprobar el efecto que tiene el hecho de que se usen dos probetas a cada lado, o solo una. Así puede verse cómo varían los resultados para una misma probeta en condiciones similares, pero cambiando el material que se coloca al otro lado de la unidad calefactora.

También se quiere ver cómo es el enfriamiento, y porqué la superficie en contacto con la unidad calefactora se enfría mucho más rápido.

En concreto, se realizan experimentos colocando un material aislante (espuma de poliuretano) al otro lado y dejando ese espacio vacío (al aire).

8.5.1. Experimento con un espacio vacío

El gráfico muestra el experimento anteriormente mencionado. La tensión aplicada es la misma que en casos anteriores, 12,5 V.

Las curvas que se representan son las referentes a las probetas de cemento con PCM. En negro, la curva correspondiente a la sonda en contacto con la unidad calefactora, en rojo la curva correspondiente a la sonda en el interior de la probeta y en verde la curva correspondiente a la sonda en la superficie en contacto con el aire. En negro, se tiene la curva correspondiente a la temperatura de la unidad calefactora.

El gráfico muestra un resultado equivalente a los de experimentos con referencia. Al igual que en anteriores experimentos, las curvas no se mantienen paralelas durante el enfriamiento, por lo que el flujo de calor no es uniaxial.

La superficie en contacto con la unidad calefactora se enfría muy rápidamente. El enfriamiento de la unidad calefactora es muy similar a la de la citada superficie. Puede decirse que dicha unidad actúa como foco frío tan pronto como se apaga la fuente de alimentación y esto hace que la superficie que está en contacto con ella se enfríe muy rápidamente.

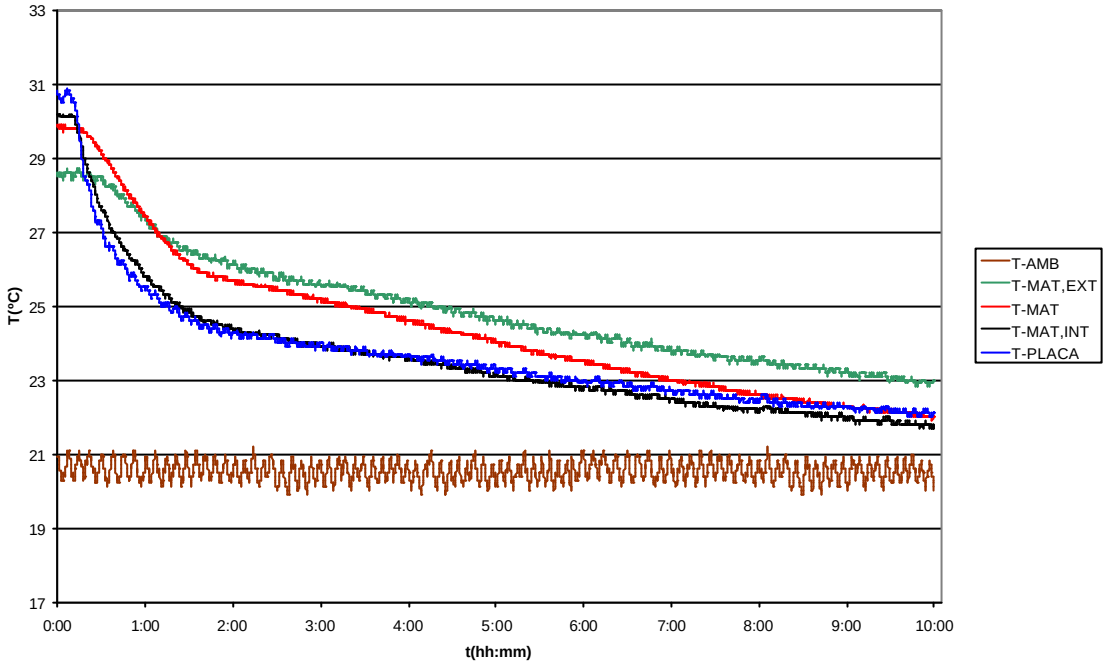


Fig. 8.5.1.1. Experimento configuración cemento con PCM 10%-aire

Para comparar los resultados de los experimentos con referencia y sin ella, se representa el gráfico de la figura. Las curvas con el sufijo (r), se refieren al experimento con referencia, las que tienen el sufijo (a), se refieren al presente ensayo.

Si se observa cada par de curvas para la misma sonda en los dos experimentos, se ve que los resultados son equivalentes. El enfriamiento en cada caso se produce durante el mismo tiempo y de la misma manera.

Se observa que las temperaturas referentes al experimento con referencia son más elevadas que en el experimento con espacio vacío. Esto puede explicarse debido a que al no haber referencia, se disipa mucho más calor por convección y por ello en el experimento con espacio vacío la probeta se calienta menos.

Esto quiere decir que dependiendo de la configuración usada los resultados varían, por lo que para poder compararse, hay que llevar a cabo experimentos con la misma configuración y para no condicionar los resultados lo más adecuado sería realizar los ensayos con una sola probeta.

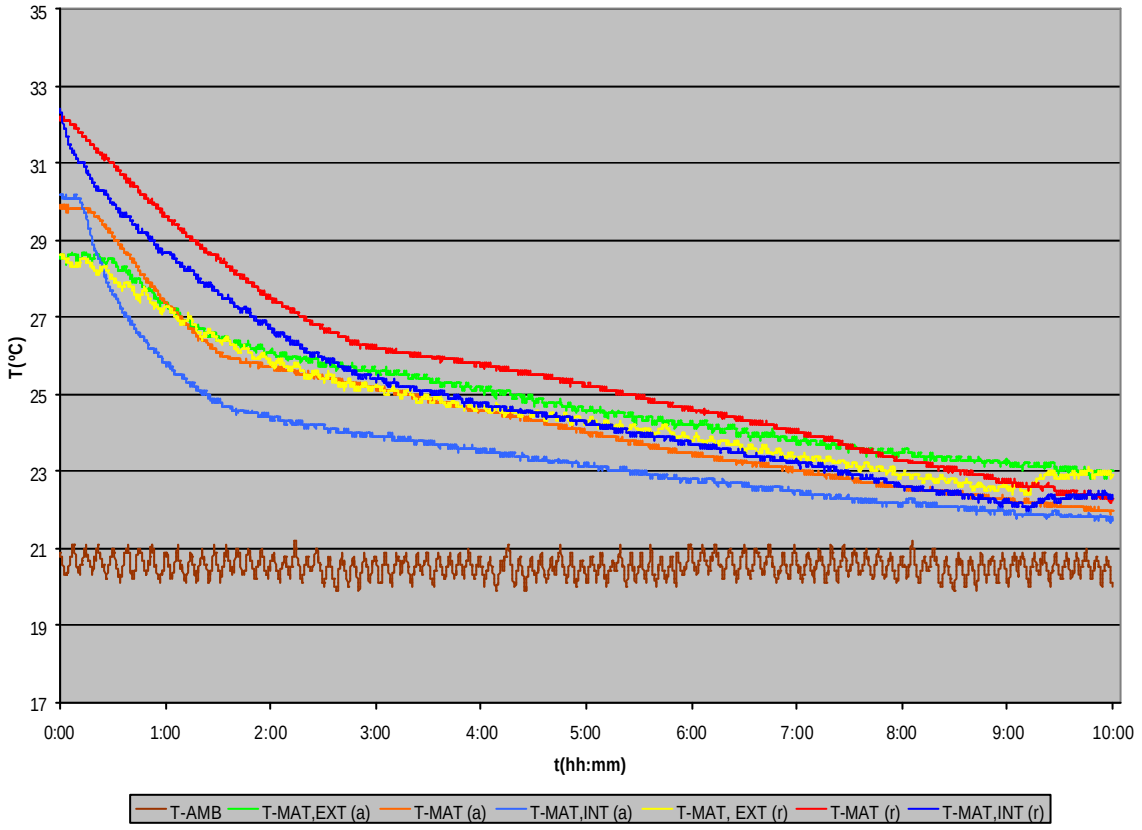


Fig. 8.5.1.2. Comparativa experimentos: con referencia-sin referencia (aire). Probeta de cemento con PCM 10%

8.5.2. Experimento con aislante

En este caso, se realiza el mismo experimento que en casos anteriores, pero sustituyendo la probeta de referencia por una de poliuretano de las mismas dimensiones. Las curvas representadas son las referentes a las tres sondas de la probeta con PCM.

Los resultados son análogos a los del experimento con espacio vacío al otro lado de la unidad calefactora. Las curvas se cruzan y la superficie en contacto con la unidad calefactora se enfría mucho más rápidamente.

La temperatura máxima alcanzada es superior en seis grados. Tal y como se ha comentado, en el experimento anterior se disipa mucho más calor por convección al estar una superficie de la unidad calefactora al aire. En este caso, dicha superficie está en contacto con un material aislante, por lo que es mucho más difícil disipar el calor.

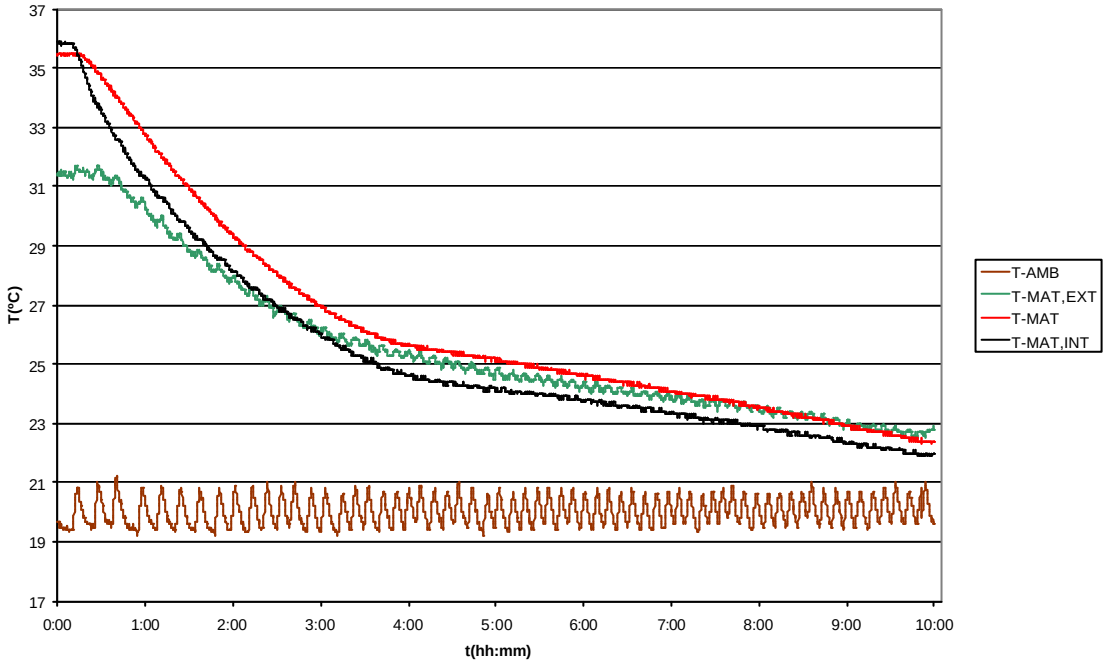


Fig. 8.5.2.1. Experimento configuración cemento PCM 10%-aislante

De nuevo, se comparan los resultados del experimento con referencia y el presente, con aislante. Las curvas con el sufijo (r), son las referentes al experimento inicial con referencia, aquellas con sufijo (i), corresponden al ensayo con aislante.

A simple vista de los resultados, destaca que las temperaturas máximas son más elevadas en el caso del ensayo con aislante. Esto se debe a que el cemento no es tan buen aislante como el poliuretano, y resulta más fácil disipar calor con el primero.

A pesar de ello, en este caso se observa que a partir del cambio de fase, que se da a los 26,5 ºC, las curvas referentes a la misma sonda, se superponen en el momento en que empieza la solidificación del PCM. Esto quiere decir que a pesar de que el aislante influye en la manera en que se enfría la probeta ensayada, no lo hace de manera tan decisiva como en anteriores experimentos, ya sea con referencia o con un espacio vacío.

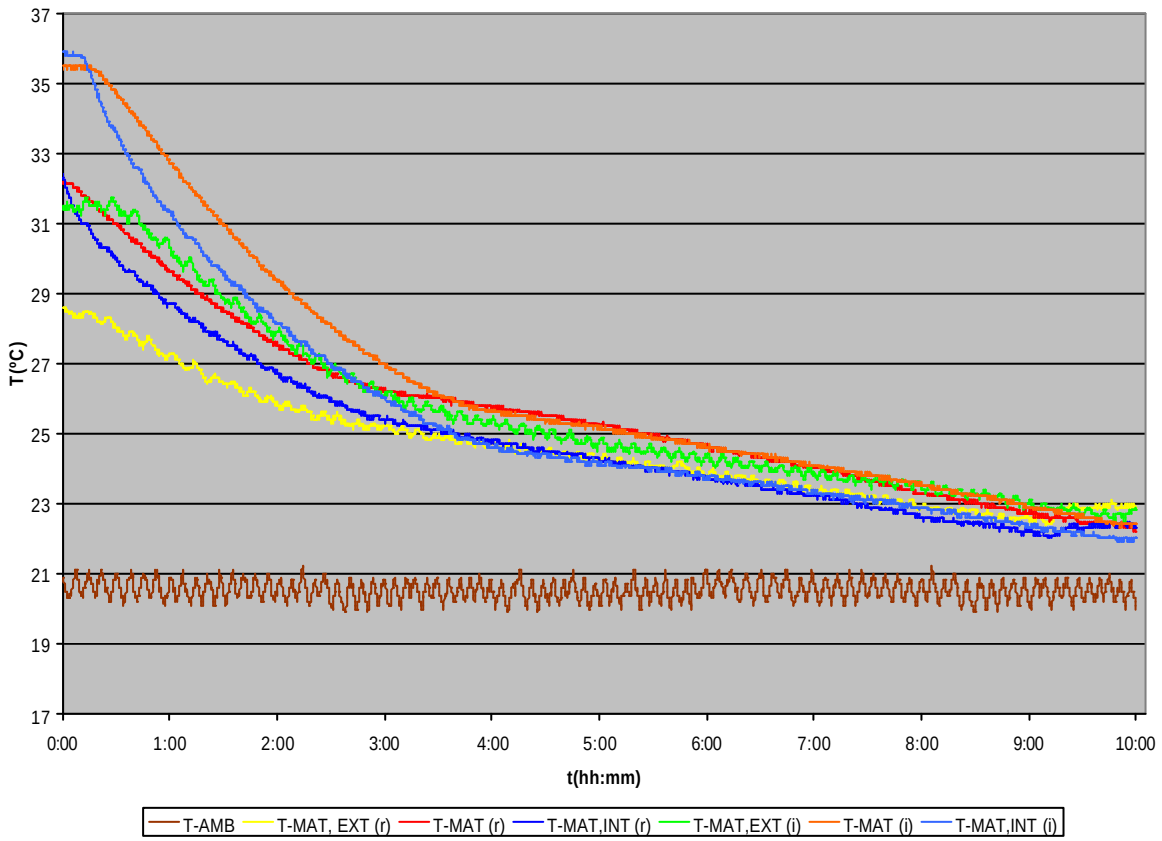


Fig. 8.5.2.2. Comparativa experimentos: con referencia-sin referencia (aislante). Probeta de cemento con PCM 10%

9. Propuesta de mejora del dispositivo T-history

A lo largo de los experimentos se observa que el dispositivo T-history, si bien cumple con el cometido de registrar la diferencia entre probetas con PCM o sin él, y de poder observar el cambio de fase de dicho PCM, se puede decir que no se cumplen las condiciones de flujo unidimensional que requiere un ensayo T-history.

Además se observa que existen diferencias en los ensayos según sea la configuración utilizada para cada uno. Esto hace que los resultados no se puedan comparar siempre.

Lo ideal es definir una tensión o intensidad de trabajo, y llevar a cabo experimentos que se puedan comparar entre sí. Si las condiciones de temperatura ambiente se controlan, las temperaturas alcanzadas serían similares para dos probetas del mismo material base y en todo caso solo se verían afectadas por la cantidad de PCM contenido en una probeta concreta.

Por ello, se decide proponer una variación de la configuración del dispositivo T-history. La instrumentación no se vería modificada, y la carcasa de poliuretano podría ser adaptada fácilmente.

Se trata de llevar a cabo ensayos con una sola probeta, en las mismas condiciones de temperatura ambiente con dos unidades calefactoras dispuestas de manera que en medio quedase la probeta a ensayar. Este subconjunto quedaría dentro de la carcasa de poliuretano.

En la figura se representa como se montaría el dispositivo T-history:

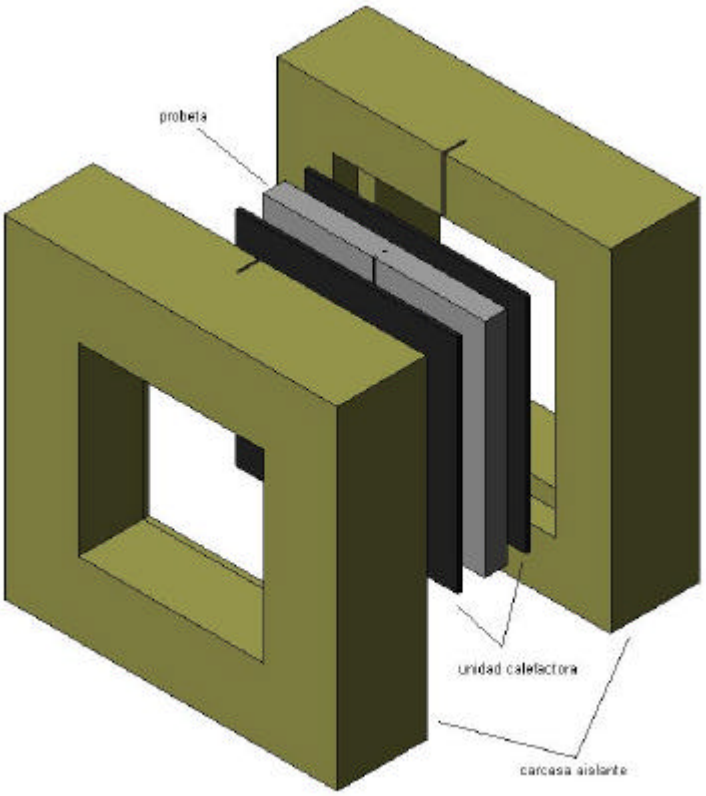


Fig. 9.1. Esquema montaje del dispositivo T-history (mejora)

Con este cambio se podría conseguir una temperatura uniforme en toda la probeta, y aprovechando el efecto de foco frío de la unidad calefactora al enfriarse muy rápidamente, se tendría un enfriamiento desde el interior de la probeta hacia fuera, una vez se apagase la fuente de alimentación.

El funcionamiento del dispositivo en conjunto se vería modificado. Para mantener una aportación de calor equivalente a la de los experimentos que se han explicado, se debería

controlar la intensidad aportada, ya que de este valor depende el calor generado por efecto Joule.

$$Q = R \cdot I^2 \quad \text{(Ec. 9.1.)}$$

Las dos unidades calefactoras serían idénticas, con la misma resistencia y por ello sería necesario asegurar que la intensidad aportada a cada una fuese la misma.

Si los experimentos anteriores se llevaban a cabo fijando la tensión en 12,5V, la intensidad, teniendo en cuenta que la resistencia de la unidad calefactora es de 13O:

$$R = \frac{V}{I} \text{, por lo tanto,}$$

$$I = \frac{12{,}5}{13} = 0{,}961A$$

Las dos unidades calefactoras se podrían conectar tanto en serie como en paralelo ya que en ambos casos, la fuente de alimentación puede suministrar la energía necesaria para asegurar una corriente concreta.

- Si se conectan las unidades calefactoras en paralelo, hay que tener en cuenta que la tensión aplicada a ambas, será la misma. La corriente que circule por cada unidad será la misma y, al tener la misma resistencia cada una, dicha corriente será la mitad del total. Por lo tanto si se quieren conectar las unidades en paralelo, se tiene q controlar la intensidad que da la fuente de alimentación y deberá ser el doble de lo que se quiera tener en cada unidad calefactora.
- Si se conectan la unidades calefactoras en serie, la intensidad que circule por ellas será la misma e igual a la que suministre la fuente de alimentación. El parámetro a controlar en este caso sería la tensión que debe ser el doble de lo necesario en el caso de una sola unidad calefactora.

En definitiva, para poder controlar la energía suministrada a cada unidad calefactora, hay que tener en cuenta como se conectan entre sí. Se debe considerar siempre qué intensidad se suministra a cada unidad calefactora.

En este caso, tal y como se ha construido el dispositivo y teniendo en cuenta la resistencia de la unidad calefactora, se podría conectar en serie sin problemas, ya que la fuente de alimentación puede dar hasta 40V. Si se quisiera aumentar mucho más la intensidad (por ejemplo al doble) o la resistencia, para aumentar el calor generado por efecto Joule, sería conveniente conectar ambas unidades calefactoras en paralelo, y usar como parámetro de control la corriente aportada.

10. Presupuesto

A continuación se describe el presupuesto detallado del proyecto:

- **Presupuesto materia prima:**

Concepto	Descripción	Coste unitario	Coste
Aluminio	300x600 mm de superfice de aluminio, 3 mm de espesor	121,92 euros/m^2	21,94 euros
Poliuretano	410x450x280 mm^3 de poliuretano	1880 euros/m^3	97,12 euros
Kanthal	Fabricación de la resistencia		1,70 euros
Cinta adhesiva polimérica Kapton	1 rollo, fabricación de la unidad calefactora	20 euros/unidad	20 euros
Pasta conductora térmica	3 botes de 50 ml	6,28 euros/unidad	18,84 euros
Tubo termoretráctil	2 tubos, aislamiento resistencia	0,83 euros/unidad	1,66 euros
Spray pintura resistente temperaturas elevadas	1 bote de spray de 400 ml	9,02 euros/unidad	9,02 euros
Madera contrachapada	0,2 m^2, fabricación del molde para probetas	9,09 euros/m^2	1,82 euros
TOTAL			172,1 euros

Tabla. 10.1. Presupuesto materia prima

- **Presupuesto instrumentación de medida:**

Concepto	Descripción	Coste unitario	Coste
Ordenador	Sistema de recogida de datos	400 euros/unidad	400 euros
Sondas Pt100 de precisión	7 sondas	82 euros/unidad	574 euros
Módulo de adquisición de datos (Data logger)		480 euros/unidad	480 euros
Conversor USB a RS-485		25 euros/unidad	25 euros
Fuente de alimentación programable		327 euros/unidad	327 euros
TOTAL			1806 euros

Tabla. 10.2. Presupuesto instrumentación de medida

- **Presupuesto material de oficina y servicios:**

Concepto	Descripción	Coste unitario	Coste
Material de oficina			50 euros
Taller mecánico	Cortar y perforar placas de aluminio para la unidad calefactora	27 euros/unidad	54 euros
Taller mecánico	Fabricación de la carcasa aislante	42 euros/unidad	84 euros
TOTAL			188 euros

Tabla. 10.3. Presupuesto material de oficina y servicios

- **Presupuesto ensayos:**

Para el cálculo del coste de los ensayos se tiene en cuenta el coste de funcionamiento de los aparatos necesarios para llevar a cabo los mismos: ordenador, fuente de alimentación programable y refrigeración (aire acondicionado).

El tiempo necesario para llevar a cabo el proyecto es de 720 horas, en la tabla se detalla el tiempo de funcionamiento de cada aparato. El precio del kWh es de 0,125273 euros/kWh.

Aparato	**Potencia (kW)**	**Tiempo de funcionamiento (h)**	**Consumo (kWh)**	**Coste**
Ordenador	0,4	720	288	36,07 euros
Fuente de alimentación	0,285	432	123,12	15,42 euros
Aparato de aire acondicionado	3	208	624	78,17 euros
TOTAL				129,66 euros

Tabla. 10.4. Presupuesto ensayos

- **Total presupuesto**

Concepto	**Descripción**	**Coste unitario**	**Coste**
Materia prima			172,1 euros
Instrumentación de medida			1806 euros
Servicios y material de oficina			188 euros
Ensayos			129,66 euros
Honorarios ingeniero novel	720 horas	12 euros/hora	8640 euros
SUBTOTAL			10936 euros
IVA	18%		1968 euros
TOTAL			**12904 euros**

Tabla. 10.5. Presupuesto total

11. Informe de impacto ambiental

Para llevar a cabo el estudio de impacto ambiental es necesario considerar las necesidades energéticas de los diferentes aparatos y dispositivos utilizados durante la realización del proyecto.

En concreto, se debe calcular el coste energético de la construcción del dispositivo T-history y de los ensayos que se han llevado a cabo para determinar validez del mismo.

Puesto que ambas fases se han llevado a cabo en los mismos sitios y usando los mismos aparatos, no es necesario diferenciarlas, además la fabricación de las piezas o bien se ha llevado a cabo con herramientas que no requerían energía eléctrica o bien se han llevado a cabo en talleres externos.

A continuación se detallan los aparatos utilizados, con su consumo y el tiempo que han sido utilizados, y como referencia se considera que el tiempo para la realización del proyecto es de 720 horas.

Aparato	Potencia nominal (kW)	Tiempo de funcionamiento (horas)	Energía consumida (kWh)
Ordenador	0,4	720	288
Fluorescentes	0,058	720	41,76
Taladro	0,75	80	60
Dremel	0,125	20	2,5
Fuente alimentación	0,285	432	123,12
Aparato de aire acondicionado	3	208	624
Total			1139,38

Tabla. 11.1. Energía consumida durante la realización del proyecto

Se considera que 1 kWh equivale a 0,545 kg CO_2 [17], con lo que se puede calcular el equivalente respecto el consumo de energía. Puesto que se ha calculado a partir de la potencia nominal, es necesario aplicar un factor de corrección ya que los aparatos eléctricos no funcionan con este consumo todo el tiempo. En este caso se escoge un factor de 0,8, por lo tanto la energía consumida total consumida sería de 911,5 kWh.

Esto equivale a 496,77 kg de CO_2 emitidos durante la realización del proyecto.

Gestión de residuos

Durante el proyecto, la mayoría de materiales usados no ha sido necesario tratarlos, ya que los materiales como el aluminio o poliuretano sobrantes no se han desechado.

Para el resto de materiales consumibles no se ha hecho necesario ningún tipo de tratamiento específico ya que se trata de materiales convencionales como papel, guantes de plástico, agua, material de oficina variado.

Probetas ensayos

Las probetas utilizadas en los ensayos una vez terminados los mismos, se han desechado en los contenedores adecuados de escombros.

Conclusiones

A priori, el dispositivo T-history cumple con su cometido primario que es la capacidad para ensayar muestras de gran tamaño, de materiales sólidos a temperaturas bajas. Permite ver la diferencia que hay entre una probeta de cierto material y otra probeta del mismo material más PCM. Esto quiere decir que se puede observar claramente el cambio de fase del PCM microencapsulado en una cierta probeta. Además, puede cuantificarse la diferencia y calcular la duración de dicho cambio de fase.

Si bien todo lo anterior es cierto, las condiciones del ensayo T-history requieren que el flujo de calor sea unidimensional, y se ha observado que esto no se cumple. En determinados momentos de los experimentos, hay zonas de la probeta que inicialmente tienen la temperatura más elevada y pasan a tener la temperatura más baja de la probeta.

La configuración utilizada (con dos probetas, una de referencia, o bien aislante o vacío) también influye en los resultados, por lo que no siempre se pueden comparar los resultados.

Por todo ello, se propone una mejora al dispositivo que mantiene la idea inicial, pero haciendo que la probeta tenga una temperatura uniforme en toda su dimensión y aislando cada ensayo, de manera que si se reproducen las condiciones ambientales, se pueden ensayar dos probetas en momentos diferentes y comparar los resultados que se obtienen.

Agradecimientos

A la Dra. Ana Inés Fernández, directora de este proyecto.

Al Dr. Xavier Garcia Capdevila.

A Rafael Ruiz Mansilla.

A la Dra. Mercè Segarra.

A la gente del grupo DIOPMA del Dept. Ciència dels Materials i Enginyeria Metal·lúrgica de la facultat de química de la UB en general y a Padi, Helena, Miguel, Camila y Joan en particular y en ningún orden específico.

A mis amigos.

A Hortensia.

A mis padres.

Bibliografía

Referencias bibliográficas

[1] Informe "Proyectos de investigación industrial y de desarrollo, estudios de viabilidad técnica y actuaciones favorecedoras de la participación en programas de cooperación internacional en materia de I+D+i". 2007

[2] Zhang Yinping, Jiang Yi. *A simple method, the T-History method, of determining the heat of fusion, specific heat and thermal conductivity of phase-change materials, Meas. Sci. Technol.* ***10*** *(1999) 201–205.*

[3] Frank P. Incropera, David P. Dewitt. *Fundamentos de transferencia de calor, 4ª Ed. 1999. p212-217.*

[4] D. A. Neeper. *Thermal dynamics of wallboard with latent heat storage, Solar Energy 68, Issue 5, 2000, p393-403.*

[5] Rudd A. F. *Phase change material wallboard for distributed storage in buildings, ASHRAE Trans, 99(2), p339-346.*

[6] Dincer I, Rosen MA*. Thermal energy storage. Systems and applications John Wiley & Sons; 2002.*

[7] Hadorn JC*. Thernal energy storage for solar and low energy buildings, Universitat de Lleida; 2005.*

[8] Parksoy HO. *Thernal energy storage for sustainable energy consumption: fundamentals, case studies and design, Kluwer Academic Publishers Group; 2007.*

[9] Mehling H, Cabeza LF. *Heat and cold storage with PCM. An up to date introduction into basics and applications, Springer; 2008.*

[10] Farid MM, Khudhair AM, Razack SAK, Al-Hallaj S. *A review on phase change energy storage: materials and applications. Energy conversion and management, 2004, 45:1597–615.*

[11] Khudhair AM, Farid MM. *A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials, Energy Conversion and Management 2004;45:263–75.*

[12] Tyagi VV, Buddhi D. *PCM thermal storage in buildings: a state of art. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 11:1146–66.*

[13] Kenisarin M, Mahkamov K. *Solar energy storage using phase change materials. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2007; 11:1913–65.*

[14] Sharma A, Tyagi VV, Chen CR, Buddhi D. *Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2009; 13:318–45.*

[15] Cabeza LF, Castell A, Barreneche C, de Gracia A, Fernández AI. *Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2011;15:1675-1695.*

[16] Norma UNE 92-201-89, AENOR 1989; Depósito legal: M 19495-89.

[17] Xavier Roset i Juan, Marta Pujadas i Garriga, Mª Rosa González-Siso Sampedro. Informe "*REPERCUSSIÓ AMBIENTAL A L'EUPVG", 2000, Universitat Politécnica de Catalunya.*