

Trabajo Fin de Grado

Título del trabajo:

Adaptación de la metodología T-History para determinación de curvas entalpía-temperatura de materiales compuestos para aplicaciones de construcción.

Autor

María José Vijuesca Martínez
Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Director/es

Belén Zalba Nonay.
Javier Mazo Olarte.
Dpto. de Ingeniería Mecánica

Escuela de Ingeniería y Arquitectura (EINA)
20 de Noviembre de 2015

Trabajo Fin de Grado

Título del trabajo:

Adaptación de la metodología T-History para determinación de curvas entalpía-temperatura de materiales compuestos para aplicaciones de construcción.

Autor

María José Vijuesca Martínez
Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Director/es

Belén Zalba Nonay.
Javier Mazo Olarte.
Dpto. de Ingeniería Mecánica

Escuela de Ingeniería y Arquitectura (EINA)
20 de Noviembre de 2015



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D^a. _____,

con nº de DNI _____ en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)
_____, (Título del Trabajo)

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, _____

Fdo: _____

Adaptación de la metodología T-History para determinación de curvas entalpía-temperatura de materiales compuestos para aplicaciones de construcción

Resumen

El creciente interés por disminuir el calentamiento global y las emisiones que causan el efecto invernadero han motivado el desarrollo de técnicas para mejorar la eficiencia energética de los edificios.

Entre estas técnicas, se encuentran los sistemas de almacenamiento térmico de energía que emplean materiales de cambio de fase (PCM). Éstos materiales tienen la capacidad de absorber/ceder elevadas cantidades de energía durante su cambio de fase, lo que combinado con una temperatura de cambio de fase adecuada, en torno a la temperatura de confort de la habitación, reduce la variación de temperaturas dentro de la construcción.

Para el cálculo de este tipo de sistemas, se aplican programas de simulación que emplean las funciones $h(T)$ y $\lambda(T)$ para el dimensionado. Este hecho provoca que sea necesario el conocimiento de dichas funciones.

El método empleado para la determinación de $h(T)$ es el método T-History, consistente en registrar la variación de temperatura de la muestra en función del tiempo y, a través de este registro y posteriores mejoras del método, es posible determinar la curva entalpía-temperatura.

Esta técnica permite emplear muestras de tamaño considerable en los ensayos comparado con otras técnicas, así como una variación de su configuración ya que puede ser montada con componentes de laboratorio.

Por ello, se ha llevado a cabo la adaptación del método T-History realizando el dimensionado de las muestras y de los moldes más apropiados para su fabricación, la fabricación de los mismos, la elección de las sondas de temperatura y la elección del material de referencia.

Finalmente, estos componentes se han unido conformando un montaje de método T-History apto para la determinación de la curva entalpía-temperatura de materiales sólidos, en este caso, de materiales compuestos por materiales convencionales de construcción y PCM.

En la realización de los ensayos del método, se ha podido observar como la adaptación propuesta es viable, aunque se observan desviaciones en las curvas obtenidas para las muestras estudiadas respecto a las teóricas. Por ello, sería necesaria la realización de mayor número de ensayos con distintas composiciones de PCM.

Índice

| | |
|---|----|
| Capítulo 1: Introducción..... | 3 |
| 1.1. <i>Motivación</i> | 3 |
| 1.2. <i>Objetivo</i> | 3 |
| 1.3. <i>Alcance</i> | 3 |
| Capítulo 2: Conceptos Previos..... | 4 |
| 2. 1. <i>Almacenamiento térmico de energía en edificios con materiales de cambio de fase</i> | 4 |
| 2. 1. 1. <i>Almacenamiento térmico de energía</i> | 4 |
| 2. 1. 2. <i>Aplicaciones de los PCM en edificación</i> | 5 |
| 2. 1. 3. <i>Simulación de PCM's para la evaluación energética de edificios</i> | 5 |
| 2. 2. <i>Determinación de la curva entalpía vs temperatura. Método T-History</i> | 7 |
| 2. 2. 1. <i>Descripción del modelo original</i> | 7 |
| 2. 2. 2. <i>Mejoras del método T-History</i> | 10 |
| 2. 2. 3. <i>Análisis de la incertidumbre del método</i> | 12 |
| Capítulo 3: Análisis de los procesos de transferencia de calor en las muestras | 15 |
| 3.1. <i>Fundamento teórico</i> | 15 |
| 3.2. <i>Cálculo con EES y Análisis de Resultados</i> | 19 |
| Capítulo 4: Dimensionado de las muestras y Diseño de los moldes..... | 22 |
| 4.1. <i>Elección de los moldes utilizados para fabricación de probetas</i> | 22 |
| 4.1.1. <i>Presentación de alternativas</i> | 22 |
| 4.1.2. <i>Discusión y elección del tipo de molde</i> | 23 |
| 4.1.3. <i>Diseño y fabricación de los moldes</i> | 25 |
| 4.2. <i>Dimensionado de las probetas</i> | 25 |
| 4.2.1. <i>Restricción de las dimensiones de moldes disponibles sobre las dimensiones válidas teóricamente</i> | 25 |
| 4.2.2. <i>Otras consideraciones</i> | 25 |
| Capítulo 5: Elección de las Sondas de Temperatura | 28 |
| 5.1. <i>Elección de la tipología de sonda de temperatura</i> | 28 |
| 5.1.1. <i>Tipos de sondas de temperatura</i> | 28 |
| 5.1.2. <i>Características de la instalación</i> | 29 |
| 5.1.3. <i>Selección del tipo de sonda</i> | 29 |

| | |
|--|-----------|
| 5.2. Elección del modelo de sonda de temperatura | 31 |
| 5.2.1. Modelos de sondas de temperatura | 31 |
| 5.2.2. Factores a considerar en la elección | 31 |
| 5.2.3. Selección del modelo de sonda | 32 |
| 5.3. Verificación de las sondas de temperatura | 32 |
| Capítulo 6: Elección del material de referencia | 36 |
| 6.1. Propiedades deseadas para el material de referencia | 36 |
| 6.2. Determinación del material de referencia..... | 36 |
| 6.3. Pedido del material de referencia | 37 |
| Capítulo 7: Fabricación de las probetas a ensayar..... | 38 |
| 7.1. Fabricación de los moldes | 38 |
| 7.2. Proceso de fabricación de las probetas..... | 39 |
| 7.2.1. Descripción de los materiales a emplear..... | 39 |
| 7.2.2. Elaboración de un Plan de Fabricación | 39 |
| 7.2.3. Aplicación y mejoras del Plan de Fabricación..... | 41 |
| Capítulo 8: Realización de los ensayos y análisis de los resultados | 44 |
| 8.1. Aplicación del método T-History | 44 |
| 8.2. Análisis de los resultados | 45 |
| Capítulo 9: Conclusiones | 49 |
| Bibliografía | 50 |
| Nomenclatura..... | 53 |
| Anexos | 56 |

Capítulo 1: Introducción

1.1. Motivación

En el mundo se consumen grandes cantidades de combustibles fósiles, lo que ha provocado el efecto invernadero y el rápido agotamiento de éstos. En la Unión Europea, el sector de la construcción es el mayor consumidor de energía con alrededor del 40% de la energía total consumida (European Union [1]), gran parte de esta energía está directamente relacionada con la climatización de los edificios. Una acción que puede ayudar a disminuir la cantidad de energía consumida globalmente es mejorar la eficiencia energética de los edificios.

En los últimos años, los sistemas de almacenamiento de energía han ganado importancia en aplicaciones constructivas permitiendo reducir los picos de consumo de energía y el rango de fluctuación de temperaturas proporcionando un entorno con mayor confort.

Dentro de este campo, una tecnología que se ha desarrollado durante la última década son los materiales de cambio de fase (phase change material, en adelante PCM), que utilizan el principio de almacenamiento térmico de energía.

Para el dimensionado de este tipo de aplicaciones se emplean programas de simulación que emplean las funciones $h(T)$ y $\lambda(T)$. Por tanto, surge la necesidad de emplear un método experimental que permita determinar estas funciones, el método T-History.

Este método ha sido empleado anteriormente para determinar las propiedades de PCMs. Sin embargo, no se ha aplicado a la determinación de materiales compuestos por materiales convencionales de construcción y PCMs.

1.2. Objetivo

El principal objetivo de este TFG es la adaptación de la metodología T-History para la determinación de las curvas entalpía-temperatura de materiales compuestos por materiales convencionales de construcción (más concretamente cemento) y materiales de cambio de fase (PCMs).

1.3. Alcance

Para la consecución del objetivo descrito anteriormente, se realizará el diseño de los ensayos.

Para ello, se analizarán los procesos de transferencia de calor que tiene lugar y se dimensionarán las probetas de muestra. Así mismo, se diseñarán los moldes necesarios para la fabricación de éstas probetas y se procederá a su fabricación.

También se realizará la elección de las sondas de temperatura y el material de referencia más adecuados para la llevar a cabo los ensayos del método.

Finalmente, se comprobará el diseño propuesto realizando los primeros ensayos del método T-History y evaluando los intervalos de incertidumbre asociados.

Capítulo 2: Conceptos Previos

En este capítulo se ha realizado una introducción a los sistemas de almacenamiento térmico de energía en edificios. Primeramente, se explica brevemente en qué consisten los materiales de cambio de fase, así como sus aplicaciones. En la segunda parte, se describe el método T-History empleado para la determinación de la curva entalpía-temperatura de éstos.

Con esta revisión se pretende situar en contexto y justificar el interés de este TFG.

2. 1. Almacenamiento térmico de energía en edificios con materiales de cambio de fase

2. 1. 1. Almacenamiento térmico de energía

Se suele hablar de material de cambio de fase como aquél que experimenta un cambio de estado sólido-líquido-gaseoso, en las condiciones adecuadas¹ para poder usarlo en aplicaciones de almacenamiento térmico de energía. El interés de este tipo de materiales radica en que la temperatura de cambio de fase se mantiene aproximadamente constante mientras el material continúa intercambiando energía, siendo la cantidad de energía latente mayor que si se intercambiase solo calor sensible, lo que supone un sistema eficiente de almacenamiento térmico de energía [4].

Cuando a un sólido se le suministra energía, va aumentando su temperatura hasta alcanzar un cierto punto en el cual los enlaces entre las moléculas comienzan a romperse. Mientras, el material continúa absorbiendo calor en un proceso endotérmico, produciéndose el cambio de sólido a líquido [5].

Igualmente, cuando la temperatura disminuye, el material cede la energía de cambio de fase (o energía latente) y regresa a estado sólido. Este intercambio de energía, si se selecciona adecuadamente el material, se puede producir a la temperatura de confort de la habitación. En la [figura 2.1.](#), se puede observar cómo varía la temperatura de un material conforme a la energía suministrada.

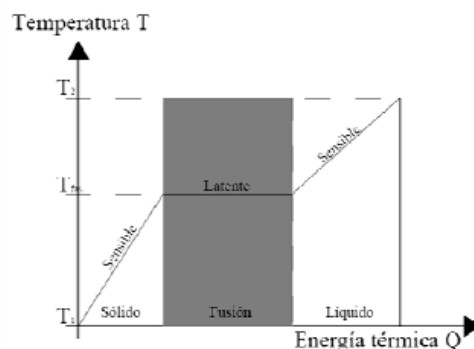


Figura 2.1.

Gráfico energía térmica frente a temperatura para el cambio de fase de una sustancia pura [2]

¹ Temperatura de cambio de fase en el rango de temperaturas de confort de la habitación, alta entalpía de cambio de fase, estabilidad química y térmica, bajo cambio volumétrico en el cambio de fase.

La energía que puede absorber el material durante el cambio de fase se conoce como entalpía de fusión o de cambio de fase.

Las diferentes clases de PCM así como sus propiedades se detallan en el Anexo-I: Conceptos Previos, apartado I.1.2. Clasificación de los materiales de cambio de fase (PCM).

2. 1. 2. Aplicaciones de los PCM en edificación

En general, se pueden distinguir dos estrategias de aplicación de PCM; utilizando el PCM en elementos pasivos de edificios como las paredes, ya sean interiores o de fachada, o formando parte de elementos activos de climatización integrados en la construcción como pueden ser las superficies radiantes (suelos, paredes y techos).

PCMs en aplicaciones pasivas

Los materiales de cambio de fase están integrados en el recubrimiento del edificio con los materiales convencionales de construcción como yeso, hormigón o polímeros².

De esta manera, la energía térmica se acumula en las paredes logrando aumentar la inercia térmica de la construcción y por tanto, disminuyendo la fluctuación diaria de temperaturas en el interior del edificio mediante su absorción o liberación.

PCMs en aplicaciones activas

En estos sistemas, la capacidad de almacenamiento de energía de los materiales de cambio de fase puede ser integrada en elementos activos como son las superficies radiantes.

Algunos ejemplos de este tipo de aplicaciones³ cuyo principal objetivo es desplazar los consumos energéticos a horas valle son:

- *Suelo radiante eléctrico con placas de SSPCM [6]*
- *Sistema de refrigeración mediante suelo frío con circulación de aire [6]*

2. 1. 3. Simulación de PCMs para la evaluación energética de edificios

Para el cálculo de las aplicaciones que emplean PCMs se utilizan técnicas de simulación.

La simulación de los PCMs ofrece ciertas dificultades en su introducción en el campo de la evaluación energética de edificios, derivadas fundamentalmente de su comportamiento no lineal en el cambio de fase.

² Los materiales compuestos con PCM se encuentran detallados en el Anexo-I: Conceptos Previos, apartado I.1.4. Materiales compuestos con PCM utilizados en la construcción.

³ Estas aplicaciones se encuentran explicadas en el Anexo-I: Conceptos Previos, apartado I.1.5. Aplicaciones de los PCM en edificación.

En general, existen diversos procedimientos para la resolución de problemas de conducción del calor transitorio en sólidos. Los más utilizados en el análisis térmico de edificios son el uso de funciones de transferencia (empleado en la mayoría de los programas de simulación de edificios; Energy Plus, TRNSYS) y métodos de elementos finitos.

Sin embargo, en el caso de los materiales de cambio de fase el primero de los métodos no es aplicable, ya que en torno a la temperatura de transición, su capacidad calorífica sufre fuertes variaciones frente a la temperatura. Esto ocasiona que la ecuación de transferencia de calor deje de poseer las deseables propiedades de linealidad [7]. En la [figura 2.2.](#) se muestra de forma gráfica esta incompatibilidad.

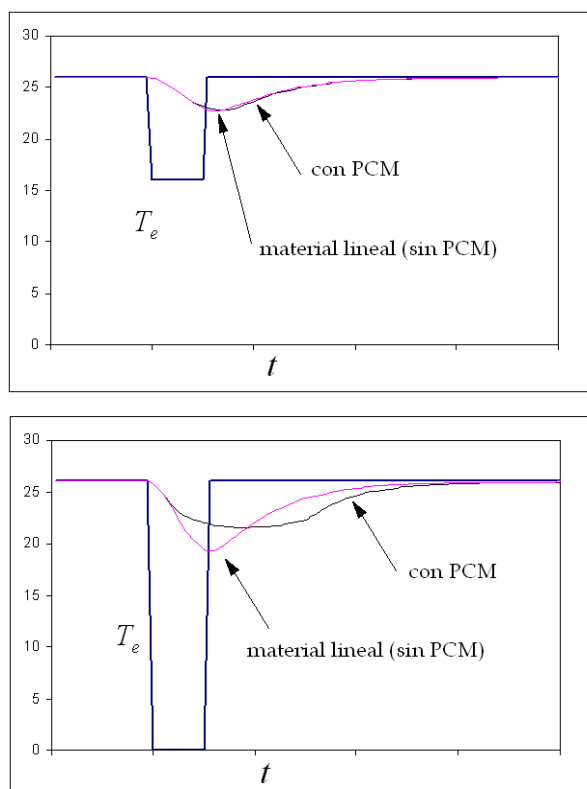


Figura 2.2.

Incompatibilidad entre el método de funciones de transferencia y la simulación de PCM [7]

Por tanto, lo más apropiado son los métodos de elementos finitos. En este segundo método de resolución, la modelización del material de cambio de fase se realiza por el método de la entalpía y se desprecia, o se engloba en una conductividad efectiva, (si el PCM está macroencapsulado⁴) la convención del material en estado líquido [2]. Por tanto, la ecuación diferencial ([ec. 1](#)) a resolver en todos los casos queda como:

$$\rho \cdot \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad [\text{ec. 1}]$$

⁴ Para más información sobre técnicas de integración de PCM consultar Anexo-I: Conceptos previos, apartado I.1.3. Técnicas de integración de PCM.

Obviamente, para la resolución de esta ecuación es necesario el conocimiento de la curva entalpía-temperatura del material de cambio de fase.

Debido a esto, surge la necesidad de emplear un método experimental que permita determinar la curva entalpía-temperatura de materiales de construcción compuestos con PCM.

2. 2. Determinación de la curva entalpía vs temperatura. Método T-History

2. 2. 1. Descripción del modelo original

El método T-History propuesto por Zhang et al. [9] permite obtener la curva entalpía-temperatura de varias muestras de PCM simultáneamente.

La instalación usada en este método se muestra en la [figura 2.3.](#) Varios tubos (uno o más) contienen la muestra de PCM, mientras que otro de los tubos contiene el material de referencia, que debe ser una sustancia de propiedades termofísicas conocidas. La instalación también consta de un sistema de adquisición de datos (data logger system), donde se registra la historia de temperaturas durante el calentamiento/enfriamiento de las muestras y la referencia.

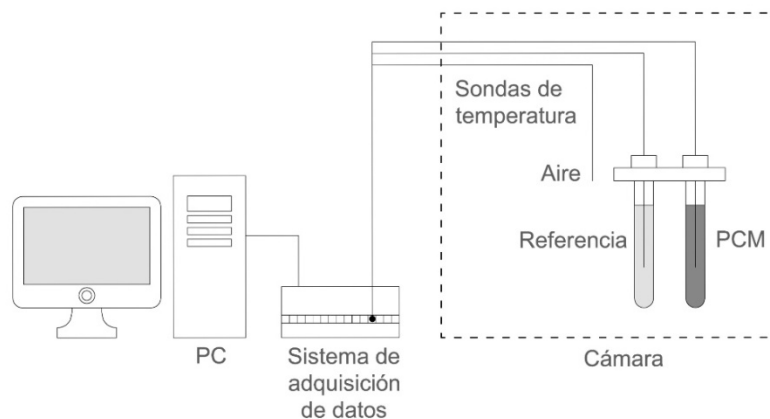


Figura 2.3.
Instalación T-History [7]

Inicialmente, se parte de dos muestras a una temperatura T_0 . Posteriormente, la muestra y la referencia son expuestas a temperatura ambiente (T_∞), originándose un cambio de temperatura. Durante el calentamiento o enfriamiento, las temperaturas de la muestra y la referencia son registradas en función del tiempo, obteniéndose las curvas del método T-History. En la [figura 2.4.](#) y la [figura 2.5.](#) se muestran el proceso de enfriamiento registrado para un PCM y para el material de referencia respectivamente.

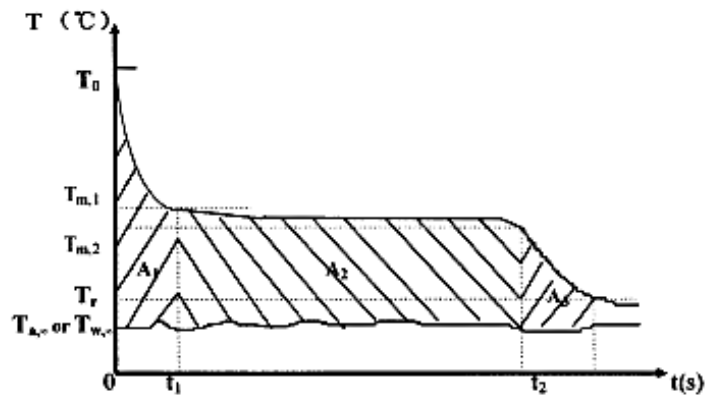


Figura 2.4.

Curva T-History de un PCM durante un proceso de enfriamiento (sin subenfriamiento) [8]

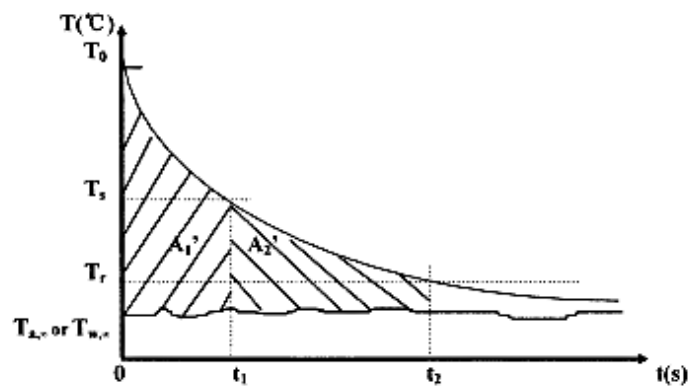


Figura 2.5.

Curva T-History del material de referencia en este caso agua durante un proceso de enfriamiento [8]

Comparando la curva obtenida para el PCM y el material de referencia, y aplicando un modelo matemático de transferencia de calor, es posible determinar la capacidad calorífica, c_p y la entalpía, h , del PCM a partir de la capacidad calorífica conocida del material de referencia.

Cuando se cumple $Bi < 0,1$ (número de Biot, $Bi = hR/(2\lambda)$ ⁵ siendo R el radio del tubo, λ la conductividad térmica del PCM y h el coeficiente de transferencia de calor entre el tubo y el aire), la distribución de temperaturas en la muestra puede considerarse uniforme y, por tanto, se puede analizar como sistema de capacidad [9]. Así, formulando los balances de energía⁶ para el PCM se tienen las ecuaciones 2,3 y 4, mientras que para el material de referencia (en este caso agua), se tienen las ecuaciones 5 y 6:

$$(m_t c_{p,t} + m_p c_{p,l})(T_0 - T_s) = hA_c \int_0^{t_1} (T - T_\infty) dt = hA_c A_1 \quad [\text{ec. 2}]$$

⁵ Se advierte al lector que para los cálculos realizados en este TFG el número de Biot empleado ha sido $Bi = \frac{hR}{\lambda} < 0,1$, ya que supone una relación más restrictiva.

⁶ Las ecuaciones 2, 3, 4, 5 y 6 se encuentran descritas con mayor detalle en el Anexo-I: Conceptos Previos apartado I.2.1.1. Descripción del modelo original.

$$m_p h_m = h A_c \int_{t_1}^{t_2} (T - T_\infty) dt = h A_c A_2 \quad [\text{ec. 3}]$$

$$(m_t c_{p,t} + m_p c_{p,s})(T_s - T_r) = h A_c \int_{t_2}^{t_3} (T - T_\infty) dt = h A_c A_3 \quad [\text{ec. 4}]$$

$$(m_t c_{p,t} + m_w c_{p,w})(T_o - T_s) = \int_0^{t_1'} (T - T_\infty) dt = h A_c A_1' \quad [\text{ec. 5}]$$

$$(m_t c_{p,t} + m_w c_{p,w})(T_s - T_r) = \int_{t_1'}^{t_2'} (T - T_\infty) dt = h A_c A_2' \quad [\text{ec. 6}]$$

Siendo:

h coeficiente de transferencia de calor [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$]

m_t masa del tubo [kg]

m_p masa del PCM [kg]

m_w masa del material de referencia [kg]

$c_{p,t}$ capacidad calorífica del tubo [$\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$]

$c_{p,l}$ capacidad calorífica del PCM líquido [$\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$]

$c_{p,s}$ capacidad calorífica del PCM sólido [$\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$]

$c_{p,w}$ capacidad calorífica del material de referencia [$\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$]

h_m entalpía de fusión del PCM [J/kg]

T temperatura [K]

T_o temperatura al inicio del ensayo [K]

T_∞ temperatura ambiente [K]

T_s temperatura de cambio de fase [K]

T_r temperatura al final del ensayo [K]

A_c área del tubo en la que se produce la transferencia de calor [m^2]

$A_1, A_2, A_3, A_1', A_2'$ áreas encerradas por las curvas obtenidas en el registro de datos [$\text{K} \cdot \text{s}$].

A partir de la [ecuación 5](#), es posible determinar h , el coeficiente de transferencia de calor del tubo que contiene el material de referencia con el entorno. De esta manera, conteniendo el material de estudio en un recipiente con las mismas propiedades geométricas que el de la referencia, el coeficiente de transferencia de calor puede ser considerado el mismo.

Por tanto, manipulando las ecuaciones anteriores se obtienen las expresiones para el cálculo de las capacidades caloríficas del PCM en estado sólido y líquido (ec. 7 y ec. 8 respectivamente) y para la entalpía de fusión, tanto para PCM con subenfriamiento como sin él (ec. 9 y ec. 10).

$$c_{p,s} = \frac{m_w c_{p,w} + m_t c_{p,t}}{m_p} \frac{A_3}{A_2} - \frac{m_t}{m_p} c_{p,t} \quad [\text{ec. 7}]$$

$$c_{p,l} = \frac{m_w c_{p,w} + m_t c_{p,t}}{m_p} \frac{A_1}{A_1'} - \frac{m_t}{m_p} c_{p,t} \quad [\text{ec. 8}]$$

$$h_m = \frac{m_w c_{p,w} + m_t c_{p,t}}{m_t} \frac{A_2}{A_1'} (T_o - T_s) \quad [\text{ec. 9}]$$

$$h_m = \frac{m_w c_{p,w} + m_t c_{p,t}}{m_t} \frac{A_2}{A_1'} (T_o - T_{m,1}) - m_t c_{p,t} \frac{(T_{m,1} - T_{m,2})}{m_p} \quad [\text{ec. 10}]$$

Con respecto a la técnica DSC, el método T-History posee diversas ventajas en la caracterización de PCMs. Entre ellas, la posibilidad de emplear muestras de mayor tamaño o la simplicidad de la instalación. En la [tabla 2.1.](#), se comparan ambos métodos.

Un hecho a destacar del método T-History es que, hasta ahora, no está disponible comercialmente. Sin embargo, el método puede ser implementado usando componentes de laboratorio estándar. Por ello, se ha propuesto un método para verificar el correcto funcionamiento de los instrumentos de la instalación y cuantificar las incertidumbres de las medidas [10]⁷.

Tabla 2.1.

Comparación entre métodos de análisis térmico [\[11\]](#)

| | DSC | T-History |
|----------------------------------|--|---|
| Tamaño de la muestra (mg) | 1-50 | 15.000 |
| Tiempo de medida (min) | 100 | 40 |
| Mantenimiento | ++ | + |
| Coste de equipo | ++ | + |
| Fenómenos | Fusión, transición vítrea, reacción (polimerización) | Fusión, cambio de fase visual, grado de subenfriamiento |
| Propiedades termofísicas | Cp f(T) h f(T) T _m | Cp f(T) h f(T) T _m λ |

2. 2. 2. Mejoras del método T-History

Diversos autores han propuesto mejoras del método original T-History. Este documento se centra en la contribución matemática realizado por Marín et al. [12, 13].

⁷ El método de verificación se puede encontrar en el Anexo-I Conceptos previos apartado 1.2.1.3. Verificación de la instalación.

En el Anexo-I: Conceptos previos apartado I.2.1.2. Mejoras del método T-History, también se encuentran detalladas las mejoras del procedimiento experimental.

Zhang et al. [8] asume en el método original que $c_{p,s}$, $c_{p,l}$ y h_m no dependen de la temperatura, siendo más adecuado para determinar las propiedades termofísicas de sustancias puras ya que poseen una zona de cambio de fase bien definida. Sin embargo, la mayoría de las sustancias de interés industrial son no puras, no existiendo una transición brusca sino gradual entre la fase sólida y la fase líquida. Por tanto, es más apropiado el uso de la entalpía y su relación con la temperatura para la caracterización de PCMs, buscando obtener las curvas entalpía-temperatura.

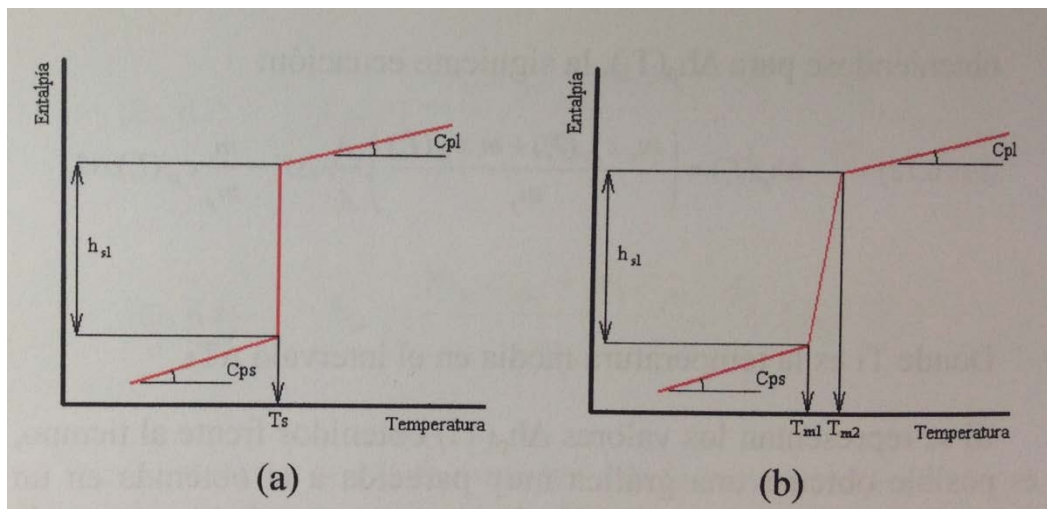


Figura 2.6.

Curva teórica entalpía-temperatura para sustancias puras (a) y no puras (b) [14]

La mejora del modelo original consiste realizar el análisis del balance de energía, tanto a la muestra como a la referencia, para un salto de temperatura $\Delta T_i = T_{i+1} - T_i$ idéntico, que se corresponde con un intervalo de tiempo $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$, distinto para la muestra y la referencia. Por tanto, la [ecuación 10](#) correspondiente con el modelo original se modificaría obteniendo la [ecuación 11](#).

$$\Delta h_p(T_i) = \left(\frac{m_w c_{p,w}(T_i) + m_t c_{p,t}(T_i)}{m_p} \right) \frac{A_i}{A_i} \Delta T_i - \frac{m_t}{m_p} c_{p,t}(T_i) \Delta T_i \quad [\text{ec. 11}]$$

Aplicando la anterior ecuación anterior, es posible obtener la curva entalpía-temperatura ([figura 2.7](#)).

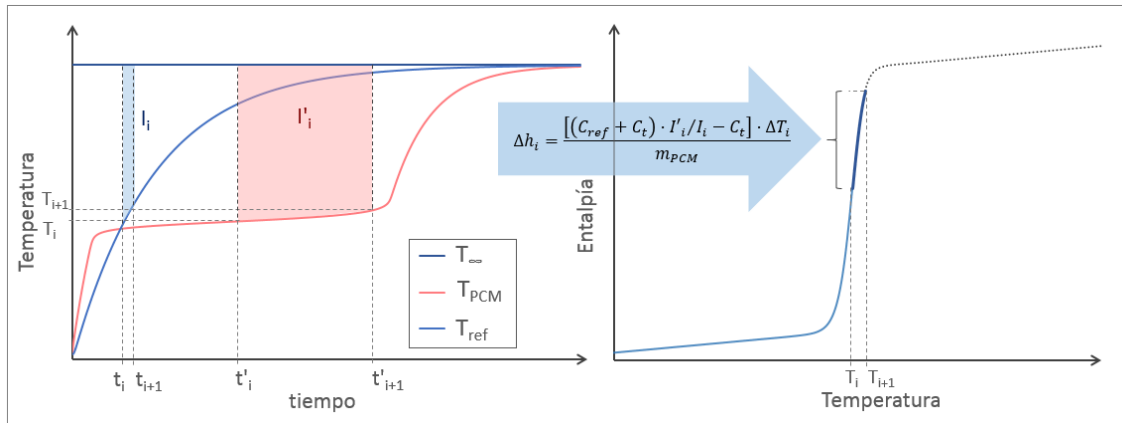


Figura 2.7.

Representación gráfica del algoritmo de integración propuesto por Marín et al. [7]

Además, a partir de los datos de este gráfico, también se puede calcular el calor específico del material en cada punto empleando la [ecuación 12](#).

$$c_p = \frac{\partial h}{\partial T} \quad [\text{ec. 12}]$$

2. 2. 3. Análisis de la incertidumbre del método

Los autores que han estudiado el método [8, 10] han coincidido en señalar la importancia de la exactitud en la medida de la temperatura en las sondas de temperatura.

Zhang et al. [8] y Rady et al. [14] proporcionan unas fórmulas para estimar la incertidumbre en el cálculo de la variación de la entalpía. Sin embargo, estas fórmulas no permiten la asignación del rango de incertidumbre a cada valor de entalpía de la curva. Por ello, Javier Mazo [7] propone un procedimiento para el cálculo de la propagación de incertidumbres a través del método T-History.

Inicialmente, se busca determinar la posible desviación en la medida de la sonda de temperatura considerando distintos niveles de temperatura. Para esto, se propone un modelo equivalente a la elaboración de una recta de calibración de la sonda a partir de las desviaciones obtenidas en los puntos T_1 y T_2 (límites del nivel de temperatura considerado). A partir de la [ecuación 13](#) se puede determinar la desviación mencionada.

$$\delta T(T) = \delta T_1 \cdot \frac{T_2 - T}{T_2 - T_1} + \delta T_2 \cdot \frac{T - T_1}{T_2 - T_1} \quad T \in [T_1, T_2] \quad [\text{ec. 13}]$$

Una vez definido el error en la medida de la temperatura, se procede a determinar su influencia sobre los cálculos del método. En la [tabla 2.8](#) se muestran las expresiones para evaluar la sensibilidad de la medida de la variación de entalpía y del calor específico con respecto a cada parámetro.

Tabla 2.8.

Sensibilidad de la medida de variación de entalpía y calor específico respecto a los errores en la medida de temperatura del sensor [7].

| Variable | Sensibilidad $\Delta\hat{h}_{PCM} _{T_1,T_2}$ ($S_{\delta T_{ij}} \cdot \delta T_{i,j}$) | Sensibilidad $\hat{c}_{p,PCM} _{T_1,T_2}$ ($S_{\delta T_{ij}} \cdot \delta T_{i,j}$) |
|--------------------|---|---|
| $\delta T_{ref,1}$ | $-\left(1 + \frac{m_t \cdot \Delta h_t}{m_{PCM} \cdot \Delta h_{PCM}}\right) \cdot \frac{T_\infty - T_2}{T_\infty - \bar{T}_{ref} _{T_1,T_2}} \cdot \frac{\delta T_{ref,1}}{T_2 - T_1}$ | $-\left(1 + \frac{m_t \cdot c_{p,t}}{m_{PCM} \cdot c_{p,PCM}}\right) \cdot \frac{T_\infty - T_2}{T_\infty - \bar{T}_{ref} _{T_1,T_2}} \cdot \frac{\delta T_{ref,1}}{T_2 - T_1}$ |
| $\delta T_{ref,2}$ | $\left(1 + \frac{m_t \cdot \Delta h_t}{m_{PCM} \cdot \Delta h_{PCM}}\right) \cdot \frac{T_\infty - T_1}{T_\infty - \bar{T}_{ref} _{T_1,T_2}} \cdot \frac{\delta T_{ref,2}}{T_2 - T_1}$ | $\left(1 + \frac{m_t \cdot c_{p,t}}{m_{PCM} \cdot c_{p,PCM}}\right) \cdot \frac{T_\infty - T_1}{T_\infty - \bar{T}_{ref} _{T_1,T_2}} \cdot \frac{\delta T_{ref,2}}{T_2 - T_1}$ |
| $\delta T_{PCM,1}$ | $\left[\left(1 + \frac{m_t \cdot \Delta h_t}{m_{PCM} \cdot \Delta h_{PCM}}\right) \cdot \frac{T_\infty - T_2}{T_\infty - \bar{T}_{PCM} _{T_1,T_2}} - 1\right] \cdot \frac{\delta T_{PCM,1}}{T_2 - T_1}$ | $\left(1 + \frac{m_t \cdot c_{p,t}}{m_{PCM} \cdot c_{p,PCM}}\right) \cdot \frac{T_\infty - T_2}{T_\infty - \bar{T}_{PCM} _{T_1,T_2}} \cdot \frac{\delta T_{PCM,1}}{T_2 - T_1}$ |
| $\delta T_{PCM,2}$ | $\left[1 - \left(1 + \frac{m_t \cdot \Delta h_t}{m_{PCM} \cdot \Delta h_{PCM}}\right) \cdot \frac{T_\infty - T_1}{T_\infty - \bar{T}_{PCM} _{T_1,T_2}}\right] \cdot \frac{\delta T_{PCM,2}}{T_2 - T_1}$ | $-\left(1 + \frac{m_t \cdot c_{p,t}}{m_{PCM} \cdot c_{p,PCM}}\right) \cdot \frac{T_\infty - T_1}{T_\infty - \bar{T}_{PCM} _{T_1,T_2}} \cdot \frac{\delta T_{PCM,2}}{T_2 - T_1}$ |
| δT_{amb} | $\left(1 + \frac{m_t \cdot \Delta h_t}{m_{PCM} \cdot \Delta h_{PCM}}\right) \cdot \frac{(\bar{T}_{PCM} _{T_1,T_2} - \bar{T}_{ref} _{T_1,T_2}) \cdot \delta T_{amb}}{(T_\infty - \bar{T}_{PCM} _{T_1,T_2}) \cdot (T_\infty - \bar{T}_{ref} _{T_1,T_2})}$ | $\left(1 + \frac{m_t \cdot c_{p,t}}{m_{PCM} \cdot c_{p,PCM}}\right) \cdot \frac{(\bar{T}_{PCM} _{T_1,T_2} - \bar{T}_{ref} _{T_1,T_2}) \cdot \delta T_{amb}}{(T_\infty - \bar{T}_{PCM} _{T_1,T_2}) \cdot (T_\infty - \bar{T}_{ref} _{T_1,T_2})}$ |

Por otro lado, se obtienen unas expresiones simplificadas de tal manera que se obtenga una estimación del intervalo de error esperable en la estimación de varios parámetros: calor específico (Ec. 14), entalpía de cambio de fase (Ec. 15) y variación entalpía total medida en el ensayo (Ec. 16).

$$\frac{\delta(c_{p,PCM}|_{T_1,T_2})}{c_{p,PCM}|_{T_1,T_2}} \approx 2 \cdot \frac{\delta T}{T_2 - T_1} \cdot \left(1 + \frac{m_t \cdot c_{p,t}}{m_{PCM} \cdot c_{p,PCM}}\right) = 2 \cdot \frac{\delta T}{T_2 - T_1} \cdot \frac{1}{C_{r,PCM}} \quad [\text{Ec. 14}]$$

$$\frac{\delta(\Delta h_{PCM}|_{T_{m1},T_{m2}})}{\Delta h_{PCM}|_{T_{m1},T_{m2}}} \approx \sqrt{2} \cdot \frac{\delta T}{T_{m2} - T_{m1}} \quad [\text{Ec.15}]$$

$$\frac{\delta(\Delta h_{PCM}|_{T_1,T_\infty})}{\Delta h_{PCM}|_{T_1,T_\infty}} \approx \sqrt{2} \cdot \frac{\delta T}{T_\infty - T_m} \cdot \left(1 + \frac{m_t \cdot \Delta h_t}{m_{PCM} \cdot \Delta h_{PCM}}\right) \quad [\text{Ec. 16}]$$

Además del error introducido por la medida de la sonda de temperatura, otro factor que se debe estudiar son los gradientes de temperatura en la muestra.

Pese a que experimentalmente algunos autores Hong et al. [15] y Rady et al. 2009 [16] consideraron válida la desestimación de los gradientes de temperatura en dirección axial, Javier Mazo [7] determina que los errores calculados no son despreciables, ya que la medida de la magnitud de entalpía de cambio de fase puede ser sobreestimada en un 10% si se mide la temperatura en el centro de la muestra, mientras que el error cometido en la determinación del calor específico puede ser de un 5%.

Debido a esto, Javier Mazo propone a partir de un análisis teórico (numérico y analítico) de la transferencia de calor en dirección radial, unas relaciones para determinar el error cometido en las medidas del método T-History originado por los gradientes de temperatura en las muestras. Asimismo, proporciona unos límites para la acotación de estos errores. Estas expresiones se muestran en la [tabla 2.9](#).

Tabla 2.9.

Correlaciones y límites para los errores producidos en las medidas del método T-History [15]

| Correlaciones | Acotación de los errores |
|---|--|
| $e_{c_p} = 0,25 \cdot C_{r,PCM} \cdot Bi_{PCM} - 0,25 \cdot \frac{C_{r,ref}^2}{C_{r,PCM}} \cdot Bi_{ref}$ | |
| $e_{h_{m,cn}} = 0,5 \cdot Bi_{PCM} - 0,25 \cdot C_{r,ref}^2 \cdot Bi_{ref}$ | $-0,22 \cdot Bi_{PCM} \leq \frac{(T_\infty - T_m) \cdot \delta T_{m,cn}}{ T_\infty - T_m ^2} \leq 0$ |
| $e_{h_{m,sur}} = -0,25 \cdot C_{r,ref}^2 \cdot Bi_{ref} - 0,6 \cdot \frac{R_t}{R_{r-c}}$ | $0,22 \cdot Bi_{PCM} \leq \frac{(T_\infty - T_m) \cdot \delta T_{m,sur}}{ T_\infty - T_m ^2} \leq 0,35 \cdot Bi_{PCM}$ |

Siendo el número de Biot empleado en estas expresiones $Bi = h \cdot R/\lambda$.

Las expresiones obtenidas de los presentes estudios serán aplicadas en el diseño de este TFG.

Capítulo 3: Análisis de los procesos de transferencia de calor en las muestras

El objetivo principal del análisis de transferencia de calor que se plantea en este capítulo es asegurar la uniformidad de la distribución de temperaturas en las muestras y que, por tanto, se puedan considerar como sistema de capacidad.

Este objetivo se puede alcanzar imponiendo $Bi < 0,1$. Esta condición, además, según los resultados del análisis teórico de Mazo et al. [15] implica que para la condición menos restrictiva del número de Biot ($Bi = hR/(2\lambda)$), la desviación máxima que se puede obtener en la determinación de la capacidad calorífica es del 5 %, mientras que la medida de la magnitud de entalpía de cambio de fase puede ser sobreestimada en un 10% si se mide la temperatura en el centro de la muestra⁸.

Así pues, en el método T-history el mecanismo de transferencia de calor entre la superficie de las muestras y su entorno condiciona, a través de la mencionada restricción para el número de Biot, la dimensión máxima de las mismas. En la disposición experimental más habitual (p.ej. Zhang et al. (1999) y Lázaro et al. (2008)) la superficie de las probetas está expuesta al ambiente interior e intercambia calor, en consecuencia mediante convección natural y radiación.

En este capítulo se analiza, para la aplicación específica del método a los materiales propuestos, las restricciones para el tamaño máximo de la muestra para distintas configuraciones del dispositivo experimental.

3.1. Fundamento teórico

Como se ha mencionado, si se cumple que el número de Biot ($Bi = hR/\lambda$ ⁹) es menor o igual que 0,1, las probetas pueden considerarse sistema de capacidad.

De la expresión del número de Biot es objeto de estudio la variable R, radio de la muestra, siendo conocidos los valores de la conductividad térmica, λ (tabla 3.1.) y pudiendo calcular teóricamente h, coeficiente de transferencia de calor de la probeta con el entorno. Esta última variable, si se utilizan estimaciones teóricas, es posible expresarla en función del radio de la probeta (R), con lo que se podría obtener un rango de resultados para el dimensionado de las probetas.

Tabla 3.1.

Propiedades termofísicas del mortero con PCM [34]

| PCM (GR27) | λ [W/(m·K)] | ρ [kg/m ³] | c_p [J/(kg·K)] |
|------------|---------------------|-----------------------------|------------------|
| 25% | 0,85±0,08 | 1560±6 | 1080±30 |
| 10% | 1,05±0,1 | 1805±9 | 1020±30 |
| 0% | 1,29±0,13 | 1950±8 | 980±30 |

⁸ Si se emplease una sonda embebida en las probetas.

⁹ En este caso, se ha empleado esta formulación del número de Biot debido a que es más restrictiva.

En la [figura 3.1](#), se muestra un modelo de montaje del método T-History, en el cual las probetas que se encuentran dentro de una cámara aislada se someten a un incremento/decremento de temperatura. Por tanto, las probetas, en contacto con el aire de dentro de la cámara, experimentan procesos de transferencia de calor por conducción (en su interior), convección natural y radiación.

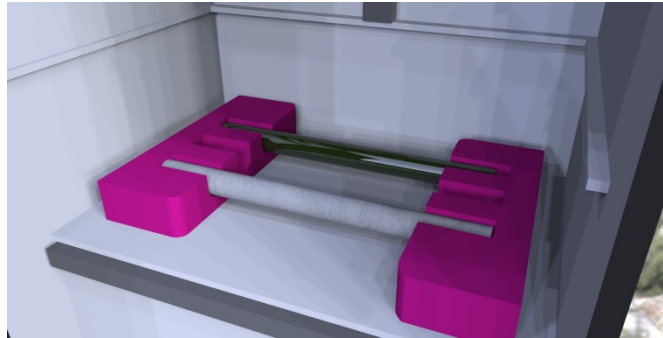


Figura 3.1.

Modelo de montaje método T-History

A continuación, se analizan tres casos con diversas configuraciones para las probetas en las que se modifican los procesos de transferencia de calor que tienen lugar.

Caso 1

Las probetas sin ningún tipo de recubrimiento con baja emisividad térmica (Sin apantallar) se encuentran en contacto directo con el aire de la cámara. Por tanto, si se considera que la temperatura del aire interior (T_a) y la media radiante que percibe la muestra es idéntica (T_{mr}), se pueden analizar, de una forma sencilla la transferencia de calor sobre su superficie por medio de un circuito térmico en el que se disponen, en paralelo, las resistencias equivalentes a los fenómenos de convección natural y de radiación. En la [figura 3.2](#), se muestra el esquema de transferencia de calor ideal en las probetas.

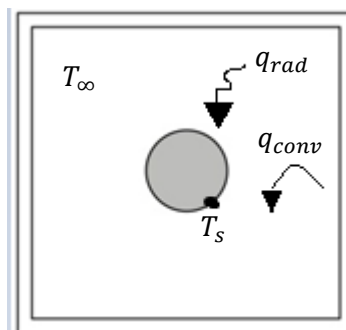


Figura 3.2.

Esquema de transferencia de calor ideal en las probetas

Así, el coeficiente de transferencia de calor global estará determinado por la suma de los correspondientes a la convección natural y a la radiación. ([ec.1](#)).

$$h_{total} = h_{conv} + h_{rad} \quad [ec.1]$$

Para determinar el coeficiente de transferencia de calor debido a convección natural se ha empleado la [ecuación 2](#), donde el número de Nusselt viene determinado por la relación de Churchill-Chu [], [ecuación 3](#).

$$Nus_D = \frac{h_{conv} \cdot D}{\lambda} \quad [ec.2]$$

$$Nus_D = \left[0.6 + \frac{0.387 \cdot Ra_D^{1/6}}{\left(1 + \left[\frac{0.559}{Pr}\right]^{9/16}\right)^{8/27}} \right]^2 \quad [ec.3]$$

Siendo Ra_D y Pr el número de Rayleigh y el número de Prandtl respectivamente. En la [ecuación 4](#) y la [ecuación 5](#) se muestran las ecuaciones de dichos números.

$$Ra_D = \frac{g \cdot \beta \cdot [T_s - T_a] \cdot D^3}{\nu \cdot \alpha} \quad [ec.4]$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad [ec. 5]$$

Por otra parte, el coeficiente de transferencia de calor debido a la radiación se calculará a partir de la [ecuación 6](#). Esta expresión está basada en el modelo de intercambio radiativo entre dos superficies grises (muestra y cámara) separadas por un medio no participativo. Por tanto, se ha despreciado la contribución de la radiación entre las dos muestras. Como además, el área de la muestra es considerablemente inferior a la de la cámara, el factor de vista se aproxima a la unidad, lo cual simplifica la formulación del calor intercambiado.

$$h_{rad} = \frac{q_{rad}}{T_s - T_{mr}} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_s^2 + T_{mr}^2) \cdot (T_s + T_{mr}) \quad [ec.6]$$

Siendo ε la emisividad del material, con un valor habitual de 0,9 para superficies no metálicas ni brillantes.

Caso 2

Si el coeficiente de transferencia de calor global resultase demasiado elevado en el caso anterior, lo cual conllevaría a diámetros de probetas demasiado reducidos, existiría la posibilidad de disminuir la contribución realizada por el término debido a radiación.

El modelo de transferencia de calor sería equivalente al descrito en el caso 1. La única diferencia sería el valor de la emisividad del material, empleando un recubrimiento metálico brillante se podría suponer $\varepsilon = 0,05$.

Caso 3

Por otra parte, existe la posibilidad de emplear un material aislante recubriendo la probeta como podría ser poliestireno extruido.

En este caso, el modelo de transferencia de calor se vería modificado ya que también intervendría el proceso de conducción, además de la convección natural y la radiación. El circuito térmico se vería modificado, teniendo la resistencia debida a conducción de la probeta con el aislante en serie con las resistencias debidas a la radiación y la convección natural del aislante con el aire que se encuentran en paralelo. Por lo que la resistencia equivalente sería menor disminuyendo el coeficiente global de transferencia de calor. En la [figura 3.3.](#) se muestra el modelo ideal de transferencia de calor para probetas con aislante.

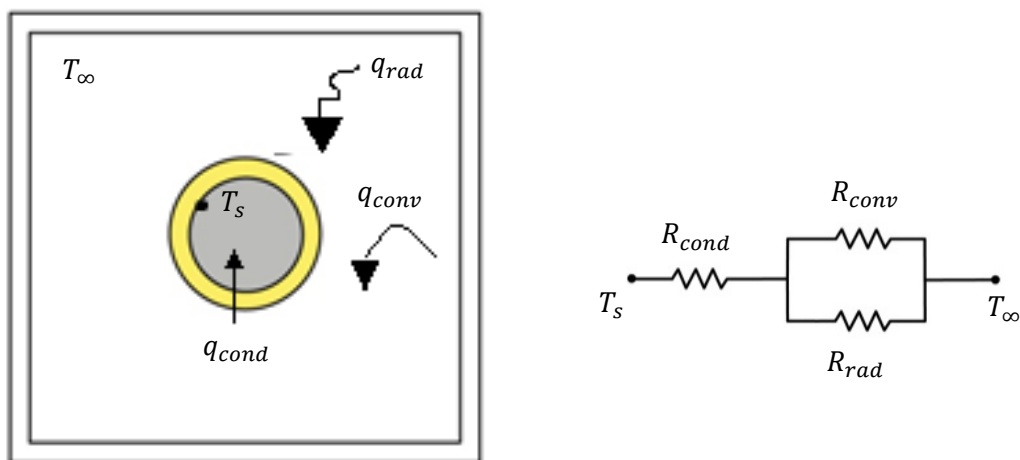


Figura 3.3.

Modelo ideal de transferencia de calor para probetas con aislante

Con respecto al modelo matemático, el coeficiente global de transferencia de calor se calcularía conforme a la [ecuación 7.](#)

$$U_{eq} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_{int} \cdot (R_{cond} + R_{conv-rad})} \quad [ec.7]$$

Donde R_{cond} se calcula según la [ecuación 8](#) y $R_{conv-rad}$ según la [ecuación 9.](#)

$$R_{cond} = \frac{\ln(r_{ext}/r_{int})}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{ais}} \quad [ec.8]$$

$$R_{conv-rad} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_{ext} \cdot h_{total}} \quad [ec.9]$$

Siendo h_{total} el coeficiente de transferencia de calor debido a convección natural y radiación, calculado según el procedimiento descrito en el caso 1.

3.2. Cálculo con EES y Análisis de Resultados

Las ecuaciones que modelizan la transferencia de calor sobre la superficie de las muestras en las distintas configuraciones analizadas, han sido implementadas en el programa de resolución de ecuaciones EES.

Caso 1

Se ha simulado en EES el proceso de enfriamiento de una probeta de mortero con 25 % de PCM, $\lambda = 0,85$ (W/m·K), que se encuentra a una temperatura superficial inicial de 313 K (40°C). La temperatura ambiente T_{∞} se ha fijado en 10°C, siendo la temperatura hasta la que se desea enfriar a la probeta de mortero.

En la [figura 3.4.](#) se muestra la variación del diámetro (D) en función de la temperatura en la superficie de la probeta (T_s) para distintos números de Biot¹⁰ impuestos.

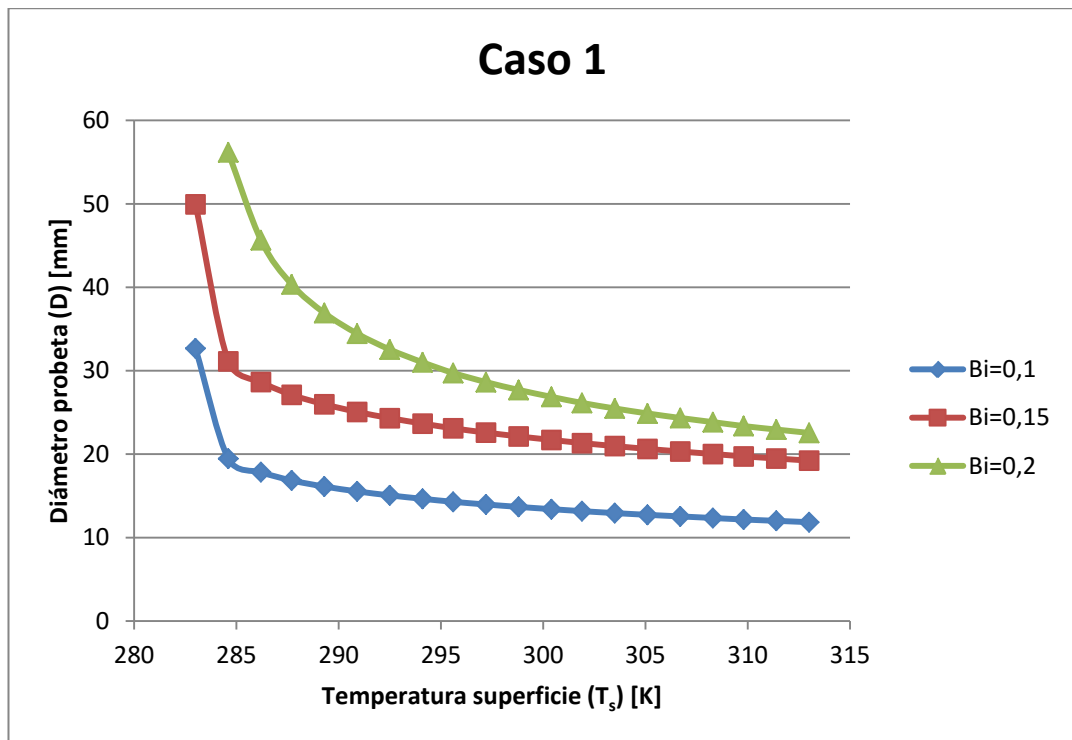


Figura 3.4.
Diámetro en función de la temperatura de la muestra, Caso 1

Como se puede apreciar en la figura anterior, para una temperatura determinada, el diámetro que cumple la condición del número de Biot impuesta, aumenta conforme se incrementa el valor de dicho número. Centrando la atención sobre la restricción $Bi=0,1$, todos los valores obtenidos entre la franja de 10 mm y, aproximadamente, 18 mm de diámetro cumplen la condición de $Bi=0,15$ para cualquier valor de temperatura T_s . Los diámetros entre aproximadamente 18 mm y 20 mm cumplen la condición de $Bi=0,2$ para

¹⁰ Siendo la ecuación del número de Biot empleada $Bi=h \cdot R/\lambda$

cualquier valor de temperatura T_s . El único valor que no cumpliría $Bi=0,15$ ni $Bi=0,2$ para cualquier valor de temperatura T_s es el valor de 32 mm.

Por tanto, puede estimarse un rango de valores para el diámetro entre aproximadamente 12 mm y 20 mm que cumplen $0,1 \leq Bi \leq 0,2$. A partir de este rango de valores, se realizará el dimensionado final en el siguiente capítulo.

Caso 2

Se ha realizado una simulación para el proceso de enfriamiento de la probeta de mortero con 25 % de PCM. Las condiciones supuestas para este caso coinciden con las explicadas anteriormente en el caso 1.

En la [figura 3.5](#), se ha realizado una representación de la variación del diámetro de las muestras en función de la temperatura en la superficie de la probeta (T_s).

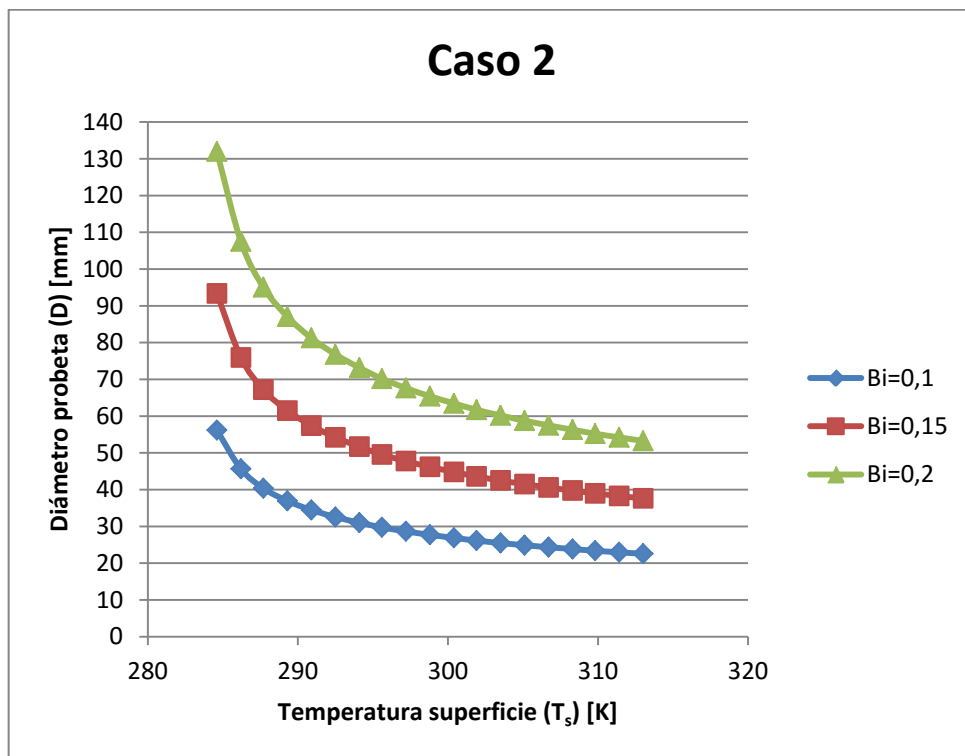


Figura 3.5.
Diámetro en función de la temperatura de la muestra, Caso 2

En este caso, se puede apreciar que el rango de diámetros de $Bi=0,1$ entre aproximadamente 35 mm y 20 mm cumplirían $Bi=0,15$ para cualquiera de las temperaturas superficiales de la probeta. Por otra parte, el rango de diámetros superior a 35 mm y hasta aproximadamente 55 mm cumpliría $Bi=0,2$.

Por tanto, sería aconsejable emplear un diámetro de probeta entre 20 mm y 35 mm. La elección final de este diámetro se realiza en el siguiente capítulo.

Caso 3

Para la simulación realizada en este caso, se han empleado los rangos de diámetros determinados anteriormente con la finalidad de conocer el espesor de aislante que sería necesario emplear.

Las condiciones de simulación han sido $T_s=313$ K, $T_\infty=283$ K y $Bi=0,1$ para una probeta de mortero con 25 % de PCM.

En la [figura 3.6](#) se muestran los resultados obtenidos con EES. Como puede apreciarse se obtendría un espesor óptimo para trabajar para probetas con diámetros entre 28 mm y 32 mm.

| 1..10 | 1 r_{int} [m] | 2 r_{ext} [m] | 3 rel radios | 4 $e_{aislante}$ [m] |
|--------|-----------------------|-----------------------|-----------------|----------------------------|
| Run 1 | 0.006 | 0.006255 | 1.042 | 0.0002546 |
| Run 2 | 0.007111 | 0.007972 | 1.121 | 0.0008606 |
| Run 3 | 0.008222 | 0.009684 | 1.178 | 0.001462 |
| Run 4 | 0.009333 | 0.01139 | 1.221 | 0.002061 |
| Run 5 | 0.01044 | 0.0131 | 1.255 | 0.00266 |
| Run 6 | 0.01156 | 0.01482 | 1.282 | 0.00326 |
| Run 7 | 0.01267 | 0.01653 | 1.305 | 0.00386 |
| Run 8 | 0.01378 | 0.01824 | 1.324 | 0.00446 |
| Run 9 | 0.01489 | 0.01995 | 1.34 | 0.005061 |
| Run 10 | 0.016 | 0.02166 | 1.354 | 0.005662 |

Figura 3.6.
Simulación para determinar espesor de aislante

Capítulo 4: Dimensionado de las muestras y Diseño de los moldes

Este capítulo contiene el procedimiento seguido para la determinación final de las dimensiones de las muestras. En la primera parte, se realiza una valoración sobre los posibles moldes que se podrían emplear para la fabricación de las probetas con la finalidad de elegir uno de ellos. En la segunda parte, a partir del molde elegido, de las conclusiones del análisis de los procesos de transferencia de calor realizado anteriormente y de otras consideraciones que serán detalladas en el presente capítulo, se realiza el dimensionado final de las muestras.

4.1. Elección de los moldes utilizados para fabricación de probetas

4.1.1. Presentación de alternativas

Las características que debe proporcionar el molde a la probeta son:

- ✓ Forma cilíndrica
- ✓ Poca o nula rugosidad en las paredes de las probetas, lo que implica que la cara interior del molde sea lisa.

En general, se pueden presentar dos alternativas en la elección de un tipo de molde, molde desechable o molde reutilizable.

Si el molde es desechable, debe ser de un material que se pueda destruir fácilmente sin dañar las probetas. Las alternativas propuestas para este tipo de moldes fueron las siguientes:

- 1ª. Tubos de PVC
- 2ª. Tubos de silicona
- 3ª. Molde con forma cilíndrica de poliestireno expandido [\[2\]](#)

En la [figura 4.1.](#) se muestran unos ejemplos de las alternativas para moldes desechables.

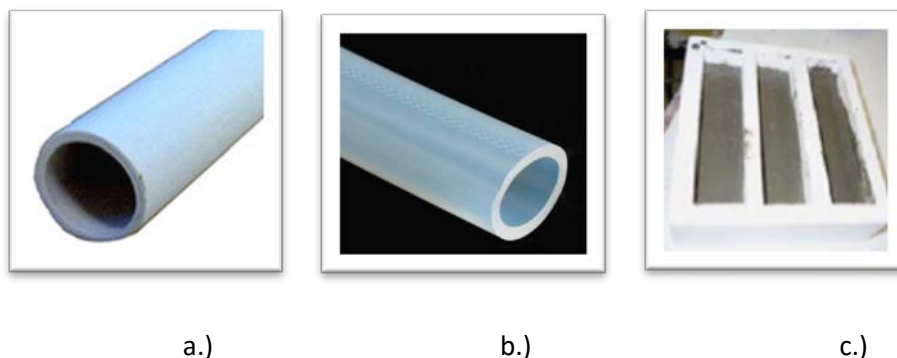


Figura 4.1.

a.) Tubo de PVC [\[18\]](#) b.) Tubo de silicona [\[19\]](#) c.) Molde de poliestireno expandido con forma rectangular [\[4\]](#)

Por otra parte, si el molde fuese reutilizable las alternativas serían:

1ª. Tubos de PVC [4]

2ª. Molde con forma cilíndrica de poliestireno extruido

En la [figura 4.2.](#) se muestran unos ejemplos de moldes reutilizables.

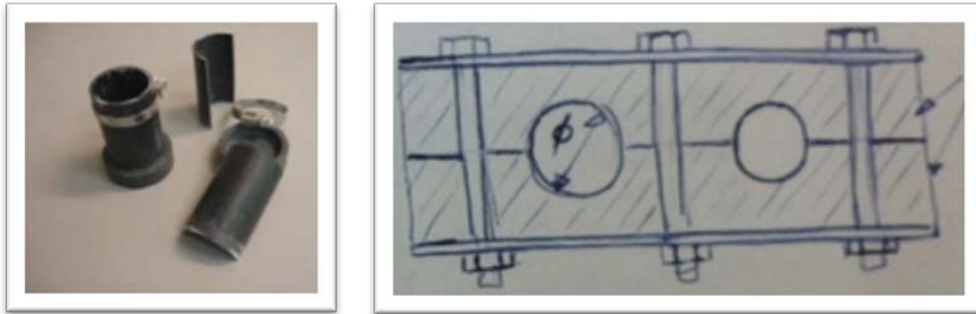


Figura 4.2.

a.) Molde de tubos de PVC [4] b.) Esquema de molde de poliestireno extruido

4.1.2. *Discusión y elección del tipo de molde*

Para la elección del tipo de molde, se ha elaborado una tabla ([tabla 4.1.](#)) donde se exponen las ventajas e inconvenientes para cada tipo de molde.

Analizando en detalle la [tabla 4.1.](#), se puede concluir que el principal inconveniente de los moldes desechables es la posible rotura de las probetas. En el caso de los tubos de PVC y silicona, la pared del tubo puede ser demasiado estrecha para cortarla con precisión. Mientras que el molde de poliestireno expandido, aunque existen referencias bibliográficas que lo han empleado [4], puede resultar complicado eliminar todo el material, ya que para conseguir la forma cilíndrica de este caso, no existiría ninguna superficie de la probeta libre. Lo que implica además, el peligro de no disipar correctamente el calor originado durante el fraguado.

Por otra parte, los moldes reutilizables proporcionan la ventaja de un desmoldado más sencillo y en principio, con una menor aplicación de fuerzas. Sin embargo, pueden ocasionarse defectos si las partes del molde no se unen con precisión, aunque teniendo en cuenta anteriores trabajos utilizando tubos de PVC [2], no se ha documentado que se hayan producido tales defectos. Respecto al molde de poliestireno extruido, no existe ningún antecedente, por lo que no se puede prever su comportamiento en cuanto a la calidad en la zona de unión del molde y al calor originado durante el fraguado.

Por estas razones, se ha decidido emplear un molde reutilizable fabricado con tubo de PVC.

Tabla 4.1.

Ventajas e inconvenientes de los distintos tipos de moldes

| Tipo de molde | Ventajas | Inconvenientes |
|---|--|---|
| Tubo de PVC desechable | <ul style="list-style-type: none"> - No existen zonas de unión donde se puedan originar rebabas u otros defectos | <ul style="list-style-type: none"> - Posible dañado y ruptura de la probeta solidificada cuando se corte el molde. - Para la fabricación de un elevado número de probetas, sería necesaria la preparación de un elevado número de moldes, lo que implica mayor coste |
| Tubo de silicona desechable | <ul style="list-style-type: none"> - No existen zonas de unión donde se puedan originar rebabas u otros defectos - Los tubos de silicona poseen mayor flexibilidad que los de PVC, por lo que es más fácil cortarlos | <ul style="list-style-type: none"> - Baja rigidez del material, por lo que puede resultar necesario un soporte para obtener la forma deseada - Si se desea la fabricación de un elevado número de probetas, sería necesaria la preparación de un elevado número de moldes |
| Poliestireno expandido desechable | <ul style="list-style-type: none"> - No existen zonas de unión donde se puedan originar rebabas u otros defectos | <ul style="list-style-type: none"> - Posible dañado de las probetas en la destrucción del molde. - Si se desea la fabricación de un elevado número de probetas, sería necesaria la preparación de un elevado número de moldes - Mayor rugosidad que tubos de PVC y silicona - Peligro de deformación del poliestireno expandido si se alzasen temperaturas superiores a 80 ° C durante el fraguado. |
| Tubos de PVC reutilizables | <ul style="list-style-type: none"> - Con unos pocos moldes se pueden fabricar cantidades elevadas de probetas -Montaje sencillo con elementos de fácil adquisición y pequeño coste | <ul style="list-style-type: none"> - Peligro de que las dos partes del molde no se ajusten bien y se originen imperfecciones como rebabas o deformación de la probeta - Peligro de que durante la fase inicial de moldeado los elementos de sujeción se aflojen creando rebabas y distorsión de las dimensiones |
| Poliestireno extruido reutilizable | <ul style="list-style-type: none"> - Con unos pocos moldes se pueden fabricar cantidades elevadas de probetas | <ul style="list-style-type: none"> - Posible formación de rebabas debido a la unión del molde - Peligro de deformación del poliestireno extruido si se alzasen temperaturas superiores a 80 ° C durante el fraguado |

4.1.3. Diseño y fabricación de los moldes

Para el diseño de los moldes de tubos de PVC, se ha consultado el catálogo de Leroy Merlin para determinar con que dimensiones de tubos se podría disponer para trabajar. En la [tabla 4.2.](#) se muestra la relación de tamaños existentes.

Tabla 4.2.

Relación de tamaños disponibles para tubos de PVC [\[18\]](#)

| Diámetro externo (mm) | Diámetro interno (mm) | Longitud (m) |
|-----------------------|-----------------------|--------------|
| 16 | 12 | 2.4 |
| 20 | 16 | 2.4 |
| 25 | 21 | 2.4 |
| 32 | 28 | 2.4 |

4.2. Dimensionado de las probetas

En esta sección se realiza una comparación entre el rango de dimensiones considerado válido para las probetas y las dimensiones disponibles de los moldes empleados para la fabricación de las probetas.

Una vez realizada esta comparación se aplicarán otras consideraciones como la resistencia teórica de las probetas o el fondo de escala de la báscula.

4.2.1. Restricción de las dimensiones de moldes disponibles sobre las dimensiones válidas teóricamente

Los rangos de diámetros considerados adecuados para las probetas han sido de 12 mm a 20 mm para el caso 1, de 20 a 35 mm para el caso 2 y de 28 mm a 32 mm para el caso 3.

Teniendo en cuenta las dimensiones de tubos de PVC disponibles, los rangos anteriores quedan reducidos a 12 mm o 16 mm para el caso 1, 21 o 28 mm para el caso 2 y 28 mm para el caso 3.

4.2.2. Otras consideraciones

Resistencia de las probetas

Se ha realizado un cálculo orientativo¹¹ modelando la probeta como viga biapoyada.

Los casos estudiados han sido dos, probeta biapoyada con carga distribuida y probeta biapoyada con carga puntual en el centro. A continuación, se detallan los resultados obtenidos en los dos casos.

¹¹ Se considera orientativo ya que los cálculos empleados se corresponden con situaciones ideales en las que solo existe flexión y aunque se ha considerado una resistencia a flexión estimada en otros estudios realizados para PCM, al tratarse de un material compuesto, la carga real capaz de soportar puede ser menor.

- Probeta biapoyada con carga distribuida¹²

Este modelo permite obtener un cálculo orientativo de la carga que puede soportar la sección de la probeta. Los resultados obtenidos con este modelo para los diámetros de estudio se muestran en la [tabla 4.3](#).

Tabla 4.3.
Carga máxima a flexión para modelo de carga distribuida

| Diámetro (mm) | Longitud (mm) | Radio (mm) | Inercia en z (mm ⁴) | Resistencia máxima a flexión (N/mm ²) | Y máxima (mm) | Carga máxima (N) | Carga máxima (kg) |
|---------------|---------------|------------|---------------------------------|---|---------------|------------------|-------------------|
| 12 | 120 | 6 | 1017,87 | 1,000 | 6,000 | 11,310 | 1,154 |
| 16 | 160 | 8 | 3216,99 | 1,000 | 8,000 | 20,106 | 2,051 |
| 21 | 210 | 10,5 | 9546,56 | 1,000 | 10,500 | 34,636 | 3,534 |
| 28 | 280 | 14 | 30171,85 | 1,000 | 14,000 | 61,575 | 6,282 |

Como puede observarse las cargas que pueden soportar las probetas no son demasiado elevadas, especialmente la probeta de 12 mm de diámetro con aproximadamente 1 kg.

- Probeta biapoyada con carga puntual en el centro¹³

Este modelo permite obtener un cálculo orientativo de la carga máxima puntual que puede soportar la probeta. Los resultados obtenidos con este modelo para los diámetros de estudio se muestran en la [tabla 4.4](#).

Tabla 4.4.
Carga máxima a flexión para modelo de carga puntual

| Diámetro (mm) | Longitud (mm) | Radio (mm) | Inercia en z (mm ⁴) | Resistencia máxima a flexión (N/mm ²) | Y máxima (mm) | Carga máxima (N) | Carga máxima (kg) |
|---------------|---------------|------------|---------------------------------|---|---------------|------------------|-------------------|
| 12 | 120 | 6 | 1017,87 | 1,00 | 6,00 | 5,65 | 0,58 |
| 16 | 160 | 8 | 3216,99 | 1,00 | 8,00 | 10,05 | 1,03 |
| 21 | 210 | 10,5 | 9546,56 | 1,00 | 10,50 | 17,31 | 1,77 |
| 28 | 280 | 14 | 30171,85 | 1,00 | 14,00 | 30,78 | 3,14 |

Como se puede observar, la carga capaz de soportar la probeta de 12 mm es pequeña por lo que sería más aconsejable emplear la probeta de 16 mm de

¹² El modelo matemático empleado se describe en el Anexo-III: Diseño de los moldes y dimensionado de las probetas de muestra apartado III.2.2. Otras consideraciones.

¹³ El modelo matemático empleado se describe en el Anexo-III: Diseño de los moldes y dimensionado de las probetas de muestra apartado III.2.2. Otras consideraciones.

diámetro. Igualmente, la probeta de 28 mm sería una mejor opción por soportar una carga de casi el doble de magnitud que la probeta de 21 mm.

Fondo de escala de la báscula

Se ha considerado este factor ya que si la masa de las probetas superase el fondo de escala de la báscula disponible en el “Laboratorio de Determinación de Propiedades Termofísicas” de la Universidad de Zaragoza, en este caso 450 g., no se podría realizar el pesado de las mismas.

En la [tabla 4.5.](#) se muestran los cálculos para determinar la masa aproximada de las probetas de muestra.

Tabla 4.5.

Masa de las probetas de muestra

| Diámetro (m) | Radio (m) | Longitud (m) | Volumen (m ³) | Densidad (kg/m ³) | Masa (g) |
|--------------|-----------|--------------|---------------------------|-------------------------------|----------|
| 0,016 | 0,008 | 0,180 | 3,619E-05 | 1560,00 | 56,458 |
| 0,028 | 0,014 | 0,300 | 1,847E-04 | | 288,172 |

Como puede observarse las probetas no superan el fondo de escala de la báscula.

Capítulo 5: Elección de las Sondas de Temperatura

En el presente capítulo se describe la elección de las sondas de temperatura a emplear en los ensayos. Se comenzará realizando la elección de la tipología de sonda para posteriormente, elegir el modelo de sonda más adecuado disponible en el mercado.

5.1. Elección de la tipología de sonda de temperatura

5.1.1. Tipos de sondas de temperatura

Existen diversos tipos de instrumentos de medida de temperatura entre los que habrá que seleccionar el más adecuado para este caso. En la [tabla 5.1.](#) se detallan las características de los transductores eléctricos de temperatura¹⁴ [\[20\]](#).

Tabla 5.1.

Características de los transductores eléctricos de temperatura [\[20\]](#)

| Tipo de elemento | Deriva | Alcance mínimo | Precisión | Repetibilidad | Temp. Máx. °C | Distancia máxima al receptor | Linealidad | Atmósfera de trabajo |
|---------------------|--|----------------|------------|---------------|---------------|------------------------------|--------------------------|---|
| Térmico | < 1% /año | 28 °C | ±1 % | ±0,25 % | 500 | 6 m | Sí, excepto vapor | Depende del material del bulbo |
| Bimetal | - | 50 °C | ±1 % | ±0,25 % | 500 | - | Buena | Depende del material |
| Resistencia de Ni | 0,3 °C/año | <11 °C | ±0,5°C | 0,05 °C | 300 | < 300 m | Escala exp. a baja temp. | A proteger en líquidos y atm. corrosiva |
| Resistencia de Pt | <0,05 °C/año | < 3°C | ±0,01 °C | 0,03 °C | 950 | < 1500 m | Excelente | A proteger en líquidos y atm. corrosiva |
| Resistencia de Cu | - | - | ±0,1 °C | - | 120 | - | Buena | A proteger en líquidos y atm. corrosiva |
| Termistor | Sin envejecer 1°C/año Envejecido <0,05 °C/año | < 1°C | ±0,005 °C | 0,03-0,11 °C | 400 | < 1500 m | Pobre | Cualquiera |
| Termopar tipo T | < 0,5 °C/año | - | 0,4-0,8 °C | ~ 0,11 °C | 370 | < 1500 m | Buena | Oxidante-reductora |
| Termopar tipo J | | | 1,1-2,2 °C | ~ 0,11 °C | 550 | - | Buena | Reductora |
| Termopar tipo K | | | ±3 °C | ~ 0,11 °C | 1100 | Limitada por Ω externos | Muy buena | Oxidante |
| Termopar tipo R y S | | | 1-3 °C | ~ 0,11°C | 1600 | Limitada por Ω externos | Buena a alta temp. | Oxidante |

¹⁴ En el Anexo-IV: Elección de las sondas de temperatura apartado IV.1.1. Tipos de sondas de temperatura, se exponen con mayor detalle las ventajas y desventajas de los instrumentos de medida de temperatura.

5.1.2. Características de la instalación

Una vez que se conocen las especificaciones de los distintos instrumentos de medida de temperatura, es necesario conocer las características a satisfacer de la instalación, en este caso del método T-History. De esta manera, las limitaciones del sistema de medida a emplear quedan definidas por las necesidades de la instalación. Estas limitaciones se exponen a continuación:

- Rango de temperatura de medida entre 10 °C y 40 °C: ya que son las temperaturas entre las que se quieren ensayar las muestras.
- Exactitud lo más elevada posible: ya que la medida de temperatura es la fuente de error más importante [8, 10].
- Medidas de temperatura de superficies sólidas: las muestras a ensayar son sólidos.

5.1.3. Selección del tipo de sonda

Se ha realizado una tabla multicriterio para determinar el tipo de sonda más apropiado para emplear en la instalación del método ([tabla 5.2.](#)). Este tipo de tablas sirven para determinar la opción más favorable para una determinada aplicación. La tabla consta de una serie de factores (condiciones más o menos importantes) comunes para cada una de las opciones que se valoran. Estos factores se puntúan para cada una de las posibles alternativas. La opción adecuada será la que posea una puntuación final más elevada.

Para esta selección, se han escogido como factores las características de la instalación explicadas en la sección anterior, y el requisito de que la sonda tenga un comportamiento lineal.

En el Anexo-IV: Elección de las Sondas de Temperatura apartado IV.1.3. Selección del tipo de sonda, se detalla el criterio tomado para determinar el grado de importancia de cada uno de los factores y la puntuación asignada a cada instrumento de medida para cada caso.

Observando la [tabla 5.2.](#), los instrumentos de medida que mejor puntuación obtienen son las resistencias de Platinos y los termopares tipo K, si bien es cierto que las resistencias de Platino son preferibles a los termopares. Por tanto, el modelo a elegir posteriormente pertenece a una de estas dos familias.

Tabla 5.2.

Matriz multicriterio de selección del tipo de instrumento de medida de temperatura

| Factor | Peso Factor | Instrumentos de medida de temperatura | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------------|-------------|---------------------------------------|----------------|----------------|----------------|-------------------|----------------|-------------------|----------------|-------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|--------------------|----------------|---|
| | | Térmico | | Bimetal | | Resistencia de Ni | | Resistencia de Pt | | Resistencia de Cu | | Termistor | | Termopar tipo T | | Termopar tipo J | | Termopar tipo K | | Termopar tipo Ry S | | |
| | | Nota ponderada | Nota ponderada | Nota ponderada | Nota ponderada | Nota ponderada | Nota ponderada | Nota ponderada | Nota ponderada | Nota ponderada | Nota ponderada | Nota ponderada | Nota ponderada | Nota ponderada | Nota ponderada | Nota ponderada | Nota ponderada | Nota ponderada | Nota ponderada | Nota ponderada | Nota ponderada | |
| Precisión | 30% | 6 | 1.8 | 6 | 1.8 | 7 | 2.1 | 9.5 | 2.85 | 8 | 2.4 | 10 | 3 | 7 | 2.1 | 6 | 1.8 | 6 | 1.8 | 6 | 1.8 | |
| Rango de temperatura | 30% | 10 | 3 | 10 | 3 | 10 | 3 | 10 | 3 | 10 | 3 | 10 | 3 | 10 | 3 | 10 | 3 | 10 | 3 | 10 | 3 | 0 |
| Medida en materiales sólidos | 20% | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 1.8 | 10 | 2 | 9 | 1.8 | 10 | 2 | 5 | 1 | 5 | 1 | 9.5 | 1.9 | 5 | 1 | |
| Linealidad | 20% | 5 | 1 | 8 | 1.6 | 2 | 0.4 | 10 | 2 | 6 | 1.2 | 1 | 0.2 | 8 | 1.6 | 8 | 1.6 | 9.5 | 1.9 | 6 | 1.2 | |
| Total | 100% | | 5.8 | | 6.4 | | 7.3 | | 9.85 | | 8.4 | | 8.2 | | 7.7 | | 7.4 | | 8.6 | | 4 | |

5.2. Elección del modelo de sonda de temperatura

5.2.1. Modelos de sondas de temperatura

Una vez determinado el tipo de sonda adecuada para la instalación del método T-History, se realizó la búsqueda de los modelos de sondas de temperaturas en diferentes empresas proveedoras de equipos para mediciones y control de temperatura, más concretamente en Omega Engineering y TC Direct [21,22].

En la [tabla 5.3](#), se muestran los distintos modelos de sondas que encajan con el perfil inicial, así como sus características.

Tabla 5.3.

Modelos de sondas de temperatura [21, 22]

| Modelo | Precisión | Dimensiones (L x A) o (D x L) | Precio (€) |
|--|------------|-------------------------------------|--------------------|
| <i>Termopar con lámina adhesiva tipo K</i> [23] | Tipo K | 25 mm x 20 mm | 7,60 |
| <i>Pt 100 Flexible adhesiva</i> [24] | Clase B | 30 mm x 14 mm | 27,80 |
| <i>Termopar SA1XL tipo K</i> [25] | Tipo K | 25,4 mm x 9,5 mm | 13,60 |
| <i>Pt 100 de superficie</i> [26] | Clase A | 25 mm x 19 mm | 49,00 |
| <i>Sensores de superficie RTD autoadhesivos de silicona y flexibles. Serie SA2C</i> [27] | Clase A | 35 mm x 12 mm o 15 mm x 50 mm | 36,00 |
| <i>Elementos de Platino RTD. Serie F2020</i> [28] + <i>Cable Pt 100 de extensión para RTD's</i> [29] | Clase 1/3 | 2,1 mm x 2,3 mm | 2,30 + 3 €/m |
| <i>Pt 100 de precisión</i> [30] | Clase 1/10 | 3 mm x 250 mm | 77,20 |
| <i>Sonda RTD. Serie PR-10</i> [31] | Clase A | 3 mm x 150 mm | 25,50 |

5.2.2. Factores a considerar en la elección

En esta sección se explican los factores¹⁵ considerados para realizar la elección del modelo de sonda más adecuado para la instalación del método T-History. Al igual que en la elección del tipo de sonda estos factores serán puntuados en una matriz multicriterio.

¹⁵ Estos factores se encuentran detallados con mayor profundidad en el Anexo-IV: Elección de las sondas de temperatura apartado IV.2.2. Factores a considerar en la elección.

- Exactitud (40 %): el peso relativo asignado es de 0,4 por tratarse de un factor determinante, ya que es la principal fuente de error en el método T-History [9, 10].

Por tanto, los sensores RTD con mejor precisión, es decir, clase 1/10 DIN y clase 1/3 DIN serán puntuadas con mayor valor que las clases A y B, obteniendo la peor puntuación en este factor los termopares tipo K.

- Tamaño de la sonda (30 %): el peso relativo asignado a este factor es de 0,3, es necesario que la sonda posea el tamaño adecuado para poder aplicarse a las muestras que se desean medir.

Por ello, las sondas con menores dimensiones se puntúan con mayor valor que las sondas con dimensiones elevadas.

- Coste (30 %): el peso relativo de este factor es de 0,3. Se ha tenido en cuenta la relación calidad-precio de las sondas, valorando las características técnicas de cada sonda y teniendo en cuenta que pueden utilizarse para realizar pruebas en el montaje de la instalación y que el resultado no sea el esperado, perdiendo la sonda de temperatura en la prueba.

Por ello, una sonda que tenga un menor coste con una precisión aceptable se ha puntuado con mayor valor.

5.2.3. Selección del modelo de sonda

Para la determinación del modelo de sonda más adecuado entre los hallados en los catálogos de los diferentes proveedores, se ha realizado una matriz multicriterio ([tabla 5.4.](#)) valorando los factores explicados anteriormente. El modelo de sonda con una mayor puntuación será la sonda elegida para llevar a cabo la adaptación del método T-History.

Como se puede observar en la [tabla 5.4.](#), la sonda de temperatura con una mayor puntuación es el Elemento de Platino RTD, serie F2020¹⁶ más el cable Pt 100 de extensión de RTD's de la empresa Omega Engineering Limited [\[21\]](#).

5.3. Verificación de las sondas de temperatura

Una vez que se disponía de las sondas Pt 100 y el cable de extensión, se soldaron con Estaño en el "Taller del Departamento de Electrónica" de la Universidad de Zaragoza.

Para comprobar el funcionamiento de las sondas de temperatura adquiridas se realizaron medidas de temperatura entre 10°C y 40°C y se compararon con la medida realizada por otra sonda de temperatura Pt 100. Las sondas fueron apantalladas

¹⁶ Las especificaciones técnicas se encuentran detalladas en el Anexo-IV: Elección de las sondas de temperatura apartado IV.2.4. Pedido de las sondas.

utilizando papel de aluminio para disminuir el posible efecto de los gradientes de temperatura.

En la [tabla 5.5](#), se muestra el error calculado para una confianza del 95 % en cada rango de temperatura medido. Además en las [figura 5.1](#), se ha representado a modo de ejemplo las medidas realizadas para 20 °C con el límite superior e inferior.

Tabla 5.5.

Error para las distintas temperaturas

| Temperatura (°C) | σ | e |
|------------------|----------|------|
| 10,00 | 0,10 | 0,19 |
| 15,05 | 0,10 | 0,19 |
| 20,00 | 0,06 | 0,11 |
| 25,00 | 0,07 | 0,14 |
| 36,00 | 0,02 | 0,04 |
| 40,00 | 0,03 | 0,07 |

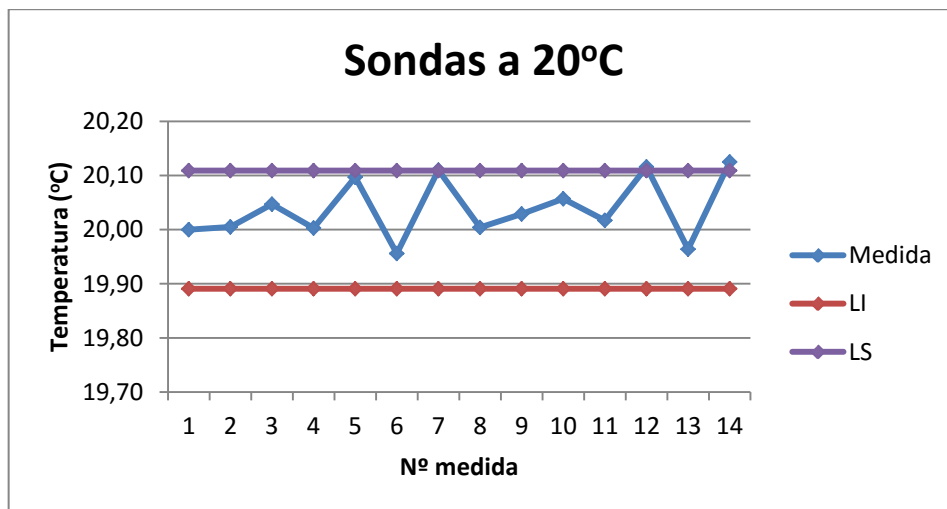


Figura 5.1.

Variabilidad de las medidas de las sondas para 20 °C

Como puede observarse el error máximo cometido en las mediciones es de 0,19. Por lo que, a la medida de la temperatura se le asignará una incertidumbre de $\pm 0,2$ °C.

Durante la medición de las temperaturas anteriores se observó la aparición de ruido en las medidas. Esta desviación puede condicionar la precisión en el cálculo de la curva $c_p(T)$, como muestra la ecuación 14 (Capítulo 1, apartado 2.2.3., $\Delta T_{int} \gg \delta T_{ruido}$). Así, para las sondas a una temperatura de 45 °C (ya que si es ruido térmico, éste aumenta con la temperatura) se ha realizado el cálculo de la varianza de la medida y se ha calculado el error para un intervalo de confianza del 95 %, obteniendo un resultado de $\pm 0,02$ °C. En la [figura 5.2](#), se ha representado el ruido de una de las sondas.

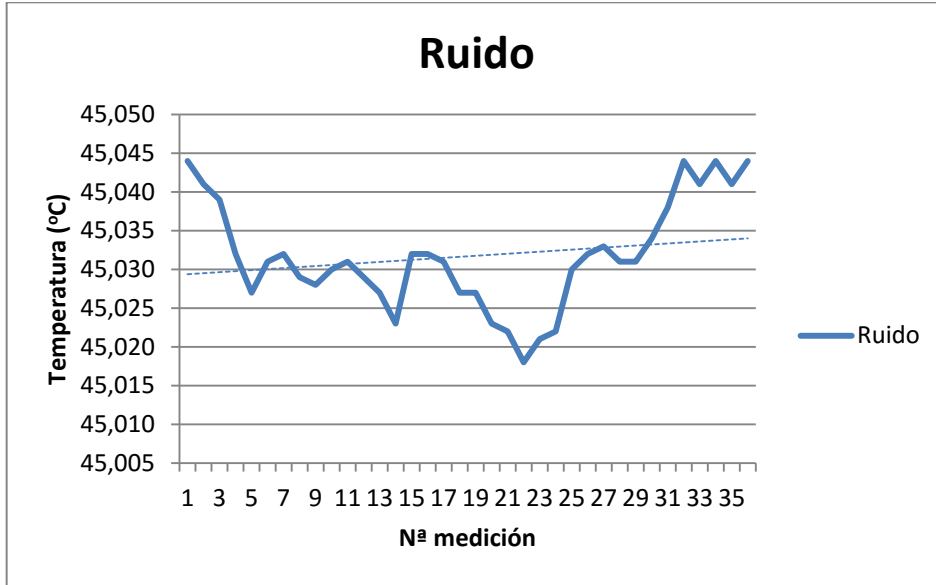


Figura. 5.2.
Ruido

Tabla 5.4.

Matriz multicriterio de selección del modelo de sonda de temperatura

| Factor | Peso Factor | Modelo de sonda de temperatura | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|-------------|-------------------------------------|----------------|--------------------------|----------------|-----------------------|----------------|----------------------|----------------|--|----------------|---|----------------|---------------------|----------------|------------------------|----------------|
| | | Termopar con lámina adhesiva tipo K | | Pt 100 Flexible adhesiva | | Termopar SA1XL tipo K | | Pt 100 de superficie | | Sensores de superficie RTD autoadhesivos de silicona y flexibles. Serie SAZC | | Elementos de Platino RTD. Serie F2020. + Cable Pt 100 de extensión para RTD's | | Pt 100 de precisión | | Sonda RTD. Serie PR-10 | |
| | | Nota | Nota ponderada | Nota | Nota ponderada | Nota | Nota ponderada | Nota | Nota ponderada | Nota | Nota ponderada | Nota | Nota ponderada | Nota | Nota ponderada | Nota | Nota ponderada |
| Precisión | 40% | 5 | 2 | 7 | 2.8 | 5 | 2 | 8 | 3.2 | 8 | 3.2 | 9 | 3.6 | 10 | 4 | 8 | 3.2 |
| Dimensiones | 30% | 6 | 1.8 | 4 | 1.2 | 5 | 1.5 | 6 | 1.8 | 4 | 1.2 | 10 | 3 | 7 | 2.1 | 7 | 2.1 |
| Coste | 30% | 9 | 2.7 | 7 | 2.1 | 8 | 2.4 | 6 | 1.8 | 6 | 1.8 | 10 | 3 | 5 | 1.5 | 7 | 2.1 |
| Total | 100% | | 6.5 | | 6.1 | | 5.9 | | 6.8 | | 6.2 | | 9.6 | | 7.6 | | 7.4 |

Capítulo 6: Elección del material de referencia

6.1. Propiedades deseadas para el material de referencia

Se presentan tres condiciones necesarias para la elección de un material de referencia adecuado:

1ª. Debe ser una sustancia de propiedades termofísicas bien conocidas. Más concretamente, para poder aplicar las ecuaciones del método [8], es necesario conocer el calor específico del material.

2ª. La sustancia no debe cambiar de fase durante el rango de temperaturas del ensayo, en este caso entre 10 °C y 40 °C.

3ª. La dinámica de la curva del material de referencia y el material a ensayar deben ser lo más parecidas posibles, ya que a partir de la comparación entre curvas se determinan las propiedades de la sustancia de estudio [9].

La dinámica de la curva viene determinada por la [ecuación 6.1.](#) Aplicando las condiciones del método T-History; misma geometría para las probetas y mismo coeficiente de transferencia de calor, la ecuación se simplificaría obteniendo la [ecuación 6.2.](#)

$$\tau = \frac{\rho \cdot c_p \cdot r}{2 \cdot h} \quad [\text{ec. 6.1.}]$$

$$\rho \cdot c_{p,\text{hormigón}} \approx \rho \cdot c_{p,\text{referencia}} \quad [\text{ec. 6.2.}]$$

6.2. Determinación del material de referencia

Para determinar el material de referencia más apropiado se el libro Fundamentals of Heat and Mass Transfer [9].

El resultado¹⁷ más aproximado fue para el vidrio dentro de los materiales con capacidad calorífica conocida. En la [tabla 6.1.](#) se muestran las propiedades del vidrio y el hormigón.

Tabla 6.1.

Comparación de propiedades entre el vidrio y el hormigón

| Material | λ [W/(m·K)] | ρ [kg/m ³] | c_p [J/(kg·K)] | $\rho \cdot c_p$ [kJ/l] | $(\rho \cdot c_p)_i / (\rho \cdot c_p)_{\text{mortero}}$ |
|----------|---------------------|-----------------------------|------------------|-------------------------|--|
| Hormigón | 0,8 | 1950 | 950 | 1,85 | - |
| Vidrio | 1,4 | 2225 | 835 | 1,86 | 1,00 |

Cabe destacar que las conductividades térmicas de estos materiales son bastante aproximadas, lo que implica números de Biot aproximadamente iguales. Este hecho provoca que los errores del método T-History sean menores según las correlaciones

¹⁷ Consultar Anexo-V: Elección del material de referencia apartado 5.2. Determinación del material de referencia.

mostradas en la tabla 2.9. del [Capítulo 2, apartado 2.2.3. Análisis de las incertidumbres del método.](#)

6.3. Pedido del material de referencia

Inicialmente, se contactó con el “Servicio de Soplado de Vidrio” de la Universidad de Zaragoza para solicitar varilla de vidrio maciza de dimensiones 16 mm de diámetro con longitud de 160 mm y 28 mm de diámetro con longitud de 280 mm. Sin embargo, no poseen varillas de dimensiones tan elevadas, sugiriendo realizar el pedido a la empresa Vidrasa S.A. [33].

Se contactó con Vidrasa S.A. [4], realizando el pedido de varillas macizas de 16 mm de diámetro con 160 mm de longitud y 30 mm de diámetro con 280 mm de longitud, siendo necesario retrabajar estas últimas varillas hasta 28 mm en el “Servicio de Soplado del Vidrio” de la Universidad de Zaragoza.

En la [figura 6.1.](#) se muestran las varillas de vidrio a emplear como material de referencia.



Figura 6.1.

Varillas de vidrio empleadas como material de referencia

Capítulo 7: Fabricación de las probetas a ensayar

Este capítulo consta de dos partes bien diferenciadas. En la primera de ellas, se describe la fabricación de los moldes empleados para obtener posteriormente las probetas. En la segunda parte, se lleva a cabo la fabricación de las probetas empleando los moldes anteriormente diseñados.

7.1. Fabricación de los moldes

Los tubos seleccionados de PVC se llevaron al “Taller del Departamento de Ingeniería Mecánica” de la Universidad de Zaragoza, donde se cortaron a una longitud de 180 mm los tubos de 16 mm de diámetro interno y a una de longitud de 300 mm los tubos de 28 mm de diámetro interno.

El resultado se puede observar en la [figura 7.1](#).

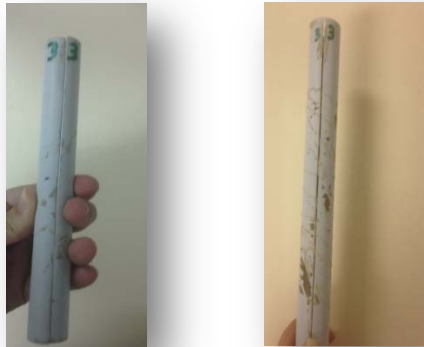


Figura 7.1.
Moldes de tubo de PVC

Con respecto a la unión del molde, inicialmente se pensó en utilizar bridas. Sin embargo, la relación longitud/diámetro de los moldes es muy elevada, lo que implica no sea posible usar una o varias bridas ya que son muy finas y el molde no queda firmemente unido. Finalmente, se decidió emplear cinta aislante para unir las dos partes del molde.

La base del molde se realizó con poliestireno extruido, introduciendo el molde ya unido a presión. En la [figura 7.2](#), se muestra el molde final que se empleará en la fabricación de las probetas.



Figura 7.2.

Molde final empleado para la fabricación de las probetas

7.2. Proceso de fabricación de las probetas

7.2.1. Descripción de los materiales a emplear

Los materiales empleados para la fabricación del mortero serán cemento, arena y agua. También se empleará el PCM objeto de estudio Rubitherm GR27. Las características de estos materiales se describen en el Anexo-VI apartado VI.2.1. Descripción de los materiales a emplear.

7.2.2. Elaboración de un Plan de Fabricación

Plan de Fabricación

1. Elaboración de probetas sin PCM

Debido al desconocimiento del posible resultado de las probetas al realizar el desencofrado; estado de los extremos de las probetas, dimensiones finales, comportamiento de los moldes, etc., se ha fijado un número inicial de probetas prototipo de dos para cada una de las dimensiones de fabricación.

El procedimiento a seguir en la elaboración del prototipo se detalla a continuación.

1.1. Establecer la dosificación entre materiales

- Relación árido/cemento 1:4 [2, 34]
- Relación agua/cemento: 0,5

1.2. Pesado de los materiales en la báscula.

1.3. Vertido y mezclado de los materiales

1.4. Llenado de los moldes

1.5. Desmoldado y limpiado de moldes.

Según la Norma UNE-EN 12390-2:2009 [34], las probetas podrán extraerse de los moldes una vez transcurridas 16 horas y no más de tres días.

Inicialmente, se fija este periodo en 24 horas aunque si se observa demasiada humedad en los extremos de las probetas, se puede alargar este periodo.

1.6. Fraguado de las probetas

El periodo de fraguado de las probetas es de 28 días para terminar de adquirir resistencia y perder agua.

1.7. Cuestiones a considerar

- Facilidad de desmoldado: necesidad de utilizar líquido desmoldante si se observase que la probeta se pega a la pared del molde.
- Agua adicionada: determinar si se consigue una buena trabajabilidad del mortero con la dosificación propuesta o por el contrario, es necesario modificarla.
- Necesidad de modificar la dosificación de áridos: valoración visual de la consistencia adquirida por el mortero.
- Dimensiones y forma de la probeta: comprobación de la longitud de las probetas, así como la forma final de las probetas teniendo en cuenta formación de rebabas, deformaciones, aire ocluido y cualquier otro defecto que pueda observarse. Valoración de las posibles deformidades y aceptación o rechazo del diseño del molde y del proceso de fabricación.

2. Preparación de probetas con PCM

Después de haber realizado las comprobaciones anteriores, se procederá a la fabricación de las probetas empleando cemento, áridos, agua y PCM.

Se propone la fabricación inicial de dos probetas de cada tamaño para valorar posibles efectos no considerados al emplear PCM.

El procedimiento a seguir en este caso se detalla en los siguientes apartados.

2.1. Establecer la dosificación entre materiales

- Relación áridos/cemento: la dosificación empleada será la determinada válida en la conformación de las probetas sin PCM menos el porcentaje en peso de la cantidad de PCM empleada.
- Relación cemento/agua: la dosificación empleada será la determinada válida en la conformación de las probetas sin PCM pudiendo ser modificada con el fin de mejorar la trabajabilidad de la mezcla.
- Porcentaje en peso de PCM empleado: inicialmente, se empleará un porcentaje en peso sobre el total de la probeta del 10 %. Una vez obtenidas este tipo de probetas, se utilizará un porcentaje del 25 %.

2.2. Procedimiento de fabricación

La fabricación de las probetas con PCM se realizará conforme al procedimiento descrito en la preparación de las probetas sin PCM.

7.2.3. Aplicación y mejoras del Plan de Fabricación

Aplicación del Plan de Fabricación

1. Elaboración de probetas sin PCM

Se procedió a la aplicación del procedimiento propuesto anteriormente. En la [figura 7.3.](#) se muestran las probetas obtenidas.

Como puede observarse, no existen deformaciones ni defectos en la superficie de las probetas y las dimensiones obtenidas son adecuadas a las calculadas. Por tanto, se continuó con la fabricación de las probetas empleando PCM.

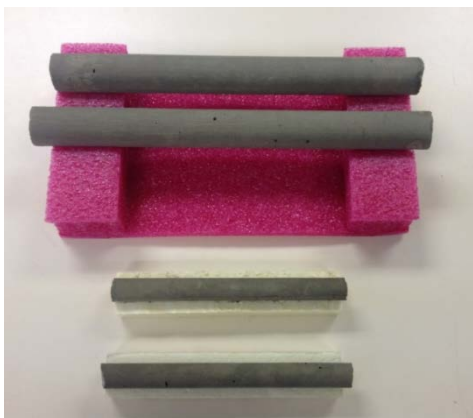


Figura 7.3.
Probetas de mortero

2. Preparación de muestras con PCM¹⁸

En este caso, se empleó aproximadamente un 15 % de exceso en agua respecto al calculado inicialmente para mejorar la trabajabilidad de la mezcla.

Una vez llenados los moldes, se dejaron fraguar 48 horas ya que, debido al exceso de agua, se apreciaban húmedas.

Cuando se procedió al desmoldado de las probetas, solo se pudo obtener una de las probetas de dimensión 28 mm de diámetro, habiéndose fracturado todas las restantes. En la [figura 7.4](#). se pueden observar las probetas fracturadas.



Figura 7.4.

Probetas fracturadas con 10 % de PCM

Para intentar solucionar este problema, se decidió ajustar la cantidad de agua añadida, reduciéndola hasta ajustarla al teórico a costa de perder trabajabilidad, ya que el agua es el principal¹⁹ factor determinante de la resistencia. Además, debido a la fragilidad de las probetas pequeñas, se decidió intentar fabricar una “probeta armada”.

En esta segunda fabricación, se utilizó un molde grande y tres pequeños, utilizando uno de los pequeños para la prueba de “probeta armada”.

El procedimiento empleado para la fabricación sigue la línea anterior, la única modificación es la introducción del alambre en el molde una vez que este se encuentra lleno con la mezcla.

Los moldes llenos se dejaron fraguar 24 horas. Transcurrido este tiempo, se procedió al desmoldado. En este caso, se fracturaron dos de las probetas de

¹⁸ Este procedimiento se encuentra detallado en el Anexo-VI, apartado VI.2.2. Aplicación y mejoras del Plan de fabricación.

¹⁹ Consultar Anexo-VI, apartado VI.2.1. Descripción de los materiales a emplear.

menor dimensión quedando en buen estado la probeta de diámetro 28 mm y la “probeta armada”.

En la [figura 7.6](#). se muestra el resultado de las probetas no fracturadas.

Debido a la fragilidad de las muestras, se decidió no elaborar la mezcla con 25 % de PCM.



Figura 7.6.

Probetas no fracturadas; arriba “probeta armada”, abajo probeta de diámetro 28 mm

Capítulo 8: Realización de los ensayos y análisis de los resultados

En este capítulo se exponen los resultados obtenidos en la realización de los primeros ensayos del método T-History, aplicando el diseño descrito en los capítulos previos.

8.1. Aplicación del método T-History

Para llevar a cabo el ensayo T-History se realizó el montaje de la instalación con los elementos seleccionados en los capítulos anteriores. En la [figura 8.1.](#) se puede observar el montaje empleado para realización del ensayo.

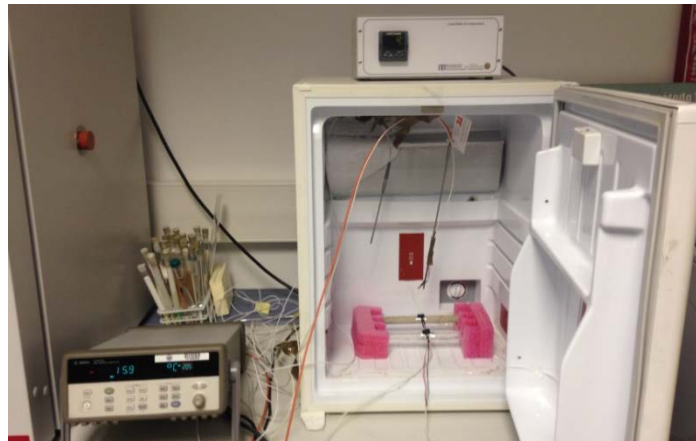


Figura 8.1.

Montaje empleado para la realización del ensayo T-History

Empleando el sistema de adquisición de datos “Agilent Technologies” se registró la temperatura de la probeta de mortero (T_s), la temperatura de la probeta de vidrio (T_{ref}) y la temperatura de la cámara (T_{∞}) en función del tiempo para un proceso de enfriamiento de las probetas. En la [figura 8.2.](#) se encuentran representados estos datos. En la siguiente sección se analizarán en detalle estos datos.

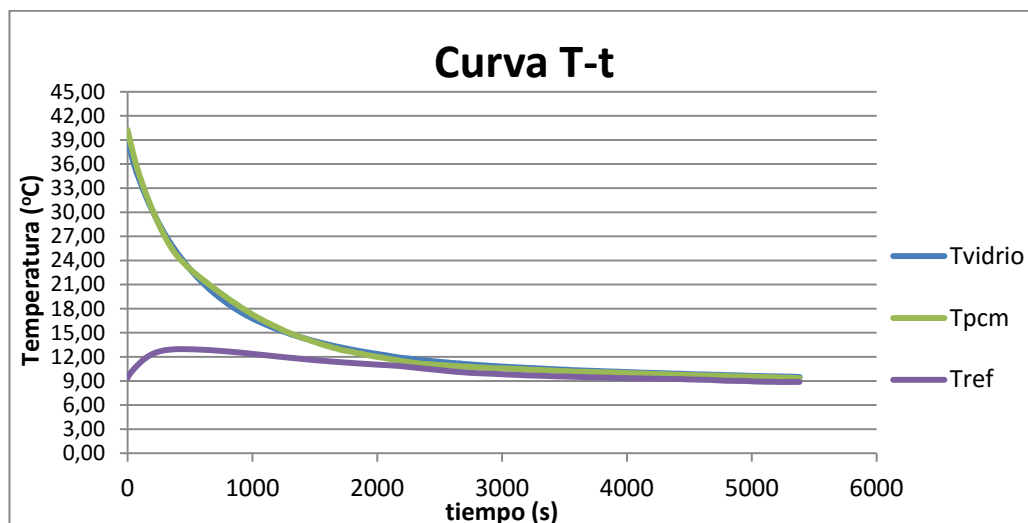


Figura 8.2.

Curva T-t

8.2. Análisis de los resultados

8.2.1. Análisis de la transferencia de calor

A partir de las temperaturas registradas en el ensayo, es posible determinar los coeficientes de transferencia de calor experimentales h_{total} , h_{conv} y h_{rad} y el número de Biot que caracteriza los experimentos.

Aplicando los balances de energía empleados en el método original [9], es posible determinar el coeficiente de transferencia de calor total h_{total} . De igual manera, el coeficiente de transferencia de calor por radiación h_{rad} , se puede determinar mediante la [ecuación 6](#) empleada en el [Capítulo 3, apartado 3.1.](#) Además, si se consideran idénticas las temperaturas del aire interior y media radiante, el coeficiente de calor debido a convección se puede obtener como la diferencia entre h_{total} y h_{rad} . Estos datos se han representado en la [figura 8.3.](#) junto con los datos teóricos obtenidos mediante la simulación en EES.²⁰ Asimismo, en la [tabla 8.1.](#) se muestran las incertidumbres de las medidas directas y de los datos de referencia empleados en el análisis. Las incertidumbres asignadas a la capacidad calorífica del vidrio y la emisividad de la superficie son debidas a que se han empleado datos tabulados y no se tiene certeza de su valor, mientras que los valores de la incertidumbre en la temperatura y el ruido han sido calculados en el [Capítulo 5, apartado 5.3.](#)

Tabla 8.1.

Incertidumbre de las medidas directas y de los datos de referencia utilizados en el análisis

| Variable | Incertidumbre |
|--|------------------------|
| $\delta c_{p,vidrio}/c_{p,vidrio}$ | $\pm 5\%$ |
| $\delta \epsilon_{sup}/\epsilon_{sup}$ | $\pm 5\%$ |
| δT | $0,2^{\circ}\text{C}$ |
| δT_{ruido} | $0,02^{\circ}\text{C}$ |

En el cálculo teórico de h_{rad} , se empleó una emisividad típica [9], por lo que se podría emplear la cámara termográfica para determinar este valor de manera más exacta.

Con respecto al coeficiente de transferencia de calor debido a convección experimental, como puede observarse, sigue una línea de tendencia diferente a la curva teórica. En la curva experimental, el incremento de temperaturas $T_{ref} - T_{\infty}$ tiene una influencia menor. Este hecho puede ser ocasionado por los errores en las temperaturas medidas, tanto del aire como de la superficie de las probetas (más críticos conforme disminuye el gradiente asociado), o porque las hipótesis de Churchill-Chu [36], difieran a las empleadas en el dispositivo experimental.

²⁰ Estos datos se encuentran detallados en el Anexo-II apartado II.3.2. Cálculo con EES y Análisis de resultados.

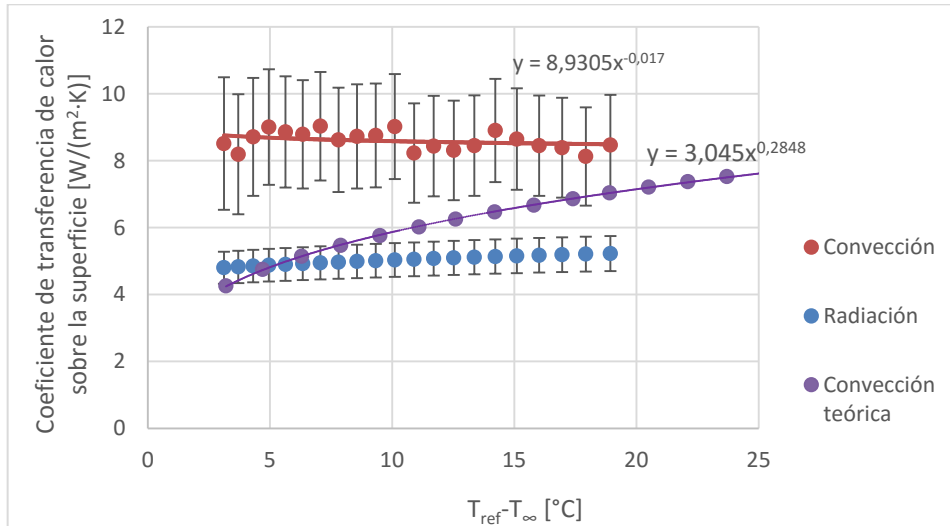


Figura 8.3.

Representación de los coeficientes de transferencia de calor en función de la temperatura

Por otra parte, a partir del coeficiente total de transferencia de calor, es posible determinar el número de Biot de los experimentos. Empleando un valor estimado de 1 W/K·m para la conductividad de la referencia y del mortero con PCM, se obtendría un valor de $Bi = h \cdot R / \lambda = 0,11$. Por tanto, se encuentra dentro de los límites determinados teóricamente.

Aplicando las ecuaciones propuestas por Mazo et al. [15]²¹ para la determinación de los errores producidos en las medidas del método T-History y empleando el anterior número de Biot, se obtiene $e_{h_{m,cn}} = (h_{m,med} - h_m) / h_m = -2,7 \%$, $e_{c_p} = (c_{p,med} - c_p) / c_p \approx 0 \%$, $\delta T_{m,max} = T_{m,med} - T_m \approx -0,7 \text{ °C}$. Destacar que en este caso, el número de Biot de la muestra y de la referencia es aproximadamente igual lo que favorece la disminución del error en la medida del calor específico.

8.2.1. Análisis de la curva h-T y c_p -T

La curva h-T se ha determinado aplicando el método propuesto por Marín et al. [12] con $\Delta T_i = 0,5 \text{ °C}$ ²² a partir de la curva T-t determinada experimentalmente (figura 8.2.).

En la figura 8.4., se representa la curva obtenida. Con el objetivo de contrastar los datos, se ha solapado a esta gráfica, la curva entalpía-temperatura calculada a partir de la caracterización realizada por Mazo [7], tanto del material granulado (GR27, Rubitherm), como del mortero ($c_p = 880 \text{ J/kg·K}$). A partir de estas medidas previas (correspondientes al granulado y al mortero), la entalpía del material compuesto se puede estimar de forma teórica mediante la siguiente ecuación:

$$h_{mortero-PCM}(T) = h_{mortero-PCM}(T_0) + (1 - x_{PCM}) \cdot c_{p,mortero} \cdot (T - T_0) + x_{PCM} \cdot h_{GR27}(T)$$

[ec.8.1.]

²¹ Tabla 2.9. Capítulo 2: Conceptos Previos apartado 2.2.3. Análisis de la incertidumbre del método.

²² No se ha elegido un paso de integración menor ya que el error de las sondas se ha estimado en 0,2, y poseen un ruido de 0,02.

También, se ha representado en la [figura 8.5](#), la curva c_p -T experimental y teórica para el PCM. Ambas curvas aparecen representadas con sus intervalos de incertidumbre asociados, en la [tabla 8.2](#), se recogen los valores de incertidumbre asociados a las medidas empleadas para la comparación.

Además, en la [tabla 8.3](#), se muestran los resultados experimentales y teóricos de $c_{p,s}$, $c_{p,l}$, Δh , T_1 y T_2 .

Tabla 8.2.

Incertidumbres de las medidas empleadas en la comparación.

| Variable | Incertidumbre |
|--------------------------------------|---|
| $\delta c_{p,mortero}/c_{p,mortero}$ | $\pm 5\%$ (Mazo, 2015) |
| Curva h-T | $\delta h_m/h_m \approx \pm 4\%$ (Mazo, 2015) |

Como se recoge en la [tabla 8.1](#), se le ha asignado un 5 % de incertidumbre al calor específico del vidrio. Ésta podría reducirse si se emplease la técnica DSC para determinar c_p (T) de la muestra.

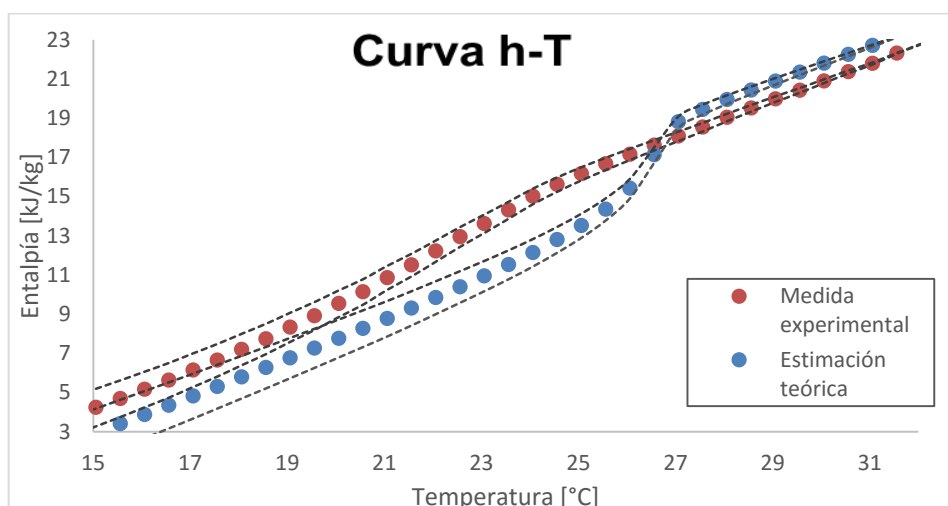


Figura 8.4.

Curva h-T

Tabla 8.3.

Valores determinados a partir de la curva experimental y la teórica

| Magnitud | Medidas experimentales | Estimación teórica (Mazo 2015) |
|----------------------|------------------------|--------------------------------|
| $c_{p,l}$ (30-34°C) | 960 ± 90 J/(kg·K) | 900 ± 90 J/(kg·K) |
| $c_{p,s}$ (12-16°C) | 850 ± 80 J/(kg·K) | 870 ± 80 J/(kg·K) |
| Δh (20-20°C) | $8,6 \pm 0,5$ kJ/kg | $9,1 \pm 0,5$ kJ/kg |

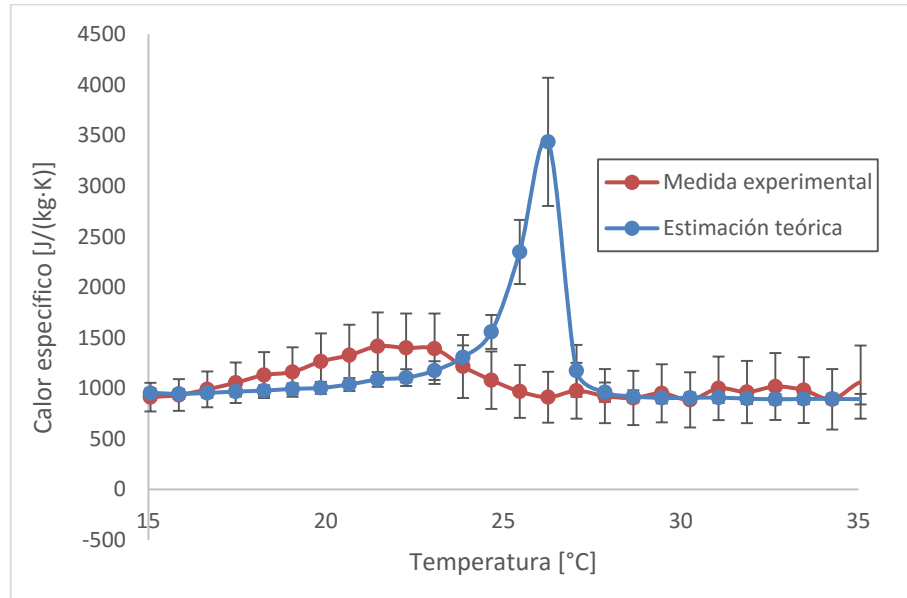


Figura 8.5.
Curva c_p -T

Observando las figuras anteriores, se advierte que las medidas experimentales del mortero con PCM subestiman la capacidad de almacenamiento del material compuesto estimada teóricamente por Mazo [7].

Esto puede ser causa de una medida errónea de la temperatura superficial del PCM, debido a la aparición de gradientes de temperatura en la muestra o a la propia sonda de temperatura. Esto podría ser solucionado realizando un análisis de la transferencia de calor en las sondas, siguiendo el modelo empleado por Palomo y Dauvergne, 2011 [35].

También puede deberse a una falta de heterogeneidad en el material ya que la densidad del PCM es menor que la densidad del mortero, lo que implica que las partículas de PCM puedan tender a ascender hacia las secciones más superiores. Este es un tema que convendría analizar más detalladamente en un futuro, así como realizar mayor número de medidas en la muestra de PCM.

Por otro lado, en las figuras obtenidas del ensayo, también se puede observar una temperatura de cambio de fase que difiere en 2°C con el modelo teórico de Mazo [7]. Siendo, además, esta diferencia superior a la diferencia que predice dicho modelo de 0,7°C. Las posibles causas que originan esta diferencia pueden ser la falta de homogeneidad en la muestra o la aparición de gradientes más acentuados en dirección radial.

Capítulo 9: Conclusiones

En este capítulo se recogen las conclusiones obtenidas de este TFG, así como las posibles líneas de trabajo futuro.

En base al trabajo realizado, se puede concluir que se ha completado el diseño de la instalación T-history y se han llevado a cabo los primeros ensayos.

A partir de los resultados obtenidos en los ensayos del método, se han observado ciertas desviaciones entre las primeras medidas obtenidas y los valores estimados teóricamente, por lo que es preciso continuar el trabajo realizando un mayor número de ensayos sobre probetas compuestas con PCM. Algunas posibles líneas futuras de trabajo serían:

- Emplear probetas con distinta composición de PCM: sería posible realizar una comparación con la curva teórica propuesta por Mazo [7] y la curva de las probetas con % 10 de PCM ya obtenida en este TFG.
- Debido a la falta de certeza en el conocimiento de la capacidad calorífica del material de referencia, cuya incertidumbre se ha estimado en $\pm 5\%$ que afecta a la determinación del calor específico en estado sólido y líquido del PCM. Este factor podría ser corregido determinando $c_p(T)$ mediante la técnica DSC.
- Emplear diversos tipos de materiales de referencia para valorar la influencia en los errores del método.
- Realizar un análisis termográfico de las probetas para determinar la posible aparición de gradientes de temperatura que afecten a las medidas de temperatura. Se podría considerar el posible aislamiento de las probetas para mejorar este factor.
- Calibración de las sondas de temperatura con el fin de reducir la incertidumbre.
- Medida de la temperatura en el centro de la muestra valorando la posible fabricación de probetas con sondas embebidas. De esta manera, se obtendría la medición de la temperatura en el centro de la probeta que teóricamente introduce una menor desviación en la temperatura de cambio de fase, pero realiza una peor estimación de la entalpía de cambio de fase [7].

Bibliografía

- [1] European Union, Directive 2012/27/EU of the European parliament and of the council of 25 October 2012 on the energy efficiency, Official Journal of the European Union, L 315 55 (2012) 1–57.
- [2] Zalba Nonay, B. Tesis doctoral: “Almacenamiento térmico de energía mediante cambio de fase. Procedimiento experimental”. Universidad de Zaragoza. Abril 2002.
- [3] Lázaro Fernandez, A. Tesis doctoral: “Almacenamiento térmico de energía mediante cambio de fase. Aplicaciones en edificios: Caracterización del comportamiento de los materiales e instalación de ensayos para prototipos de intercambio de calor con aire”. Universidad de Zaragoza. Noviembre 2008.
- [4] Fernández Lladó J., Lacasta Palacio A.M., Haurie Ibarra L. TFM: Análisis del comportamiento al fuego de materiales de construcción con adición de PCM. Universidad Politécnica de Barcelona. 2012.
- [5] Kalnaes S.E., Jelle B.P. Phase change materials and products for building applications: A state-of-the-art review and future research opportunities. *Energy and Buildings* 94, 150–176. 2015.
- [6] Mazo J. Trabajo fin de máster : Contribución del almacenamiento de la energía térmica a la eficiencia energética de los edificios. Análisis de nuevos cerramientos activos y pasivos con materiales de cambio de fase, Universidad de Zaragoza. 2010.
- [7] Mazo J. Investigación sobre la aplicación del almacenamiento de energía térmica mediante cambio de fase en elementos de construcción termoactivos, Tesis doctoral depositada en la Universidad de Zaragoza, noviembre 2015.
- [8] Zhang Y., Jiang Y., Jiang Y. A simple method, the T-history method, of determining the heat of fusion, specific heat and thermal conductivity of phase-change materials. *Measurement Science and Technology* 1999;10:201–5.
- [9] Incropera F.P., Dewitt D.P., Bergman T.L., Lavine A.S. “Fundamentals of Heat and Mass Transfer”. John Wiley & Sons, Inc. 6th edition, 2007.
- [10] Lázaro A., Günther E., Mehling H., Hiebler S., Marín M.J., Zalba B. Verification of a T-history installation to measure enthalpy versus temperature curves of phase change materials. *Measurement Science and Technology*;17:2168–74. 2006
- [11] Solé A., Miró L., Barreneche C., Martorell I., Cabeza L.F. Review of the T-history method to determine thermophysical properties of phase change materials (PCM). *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 26 , 425–436. 2013.
- [12] Marín M. J., Zalba B., Cabeza L. F., and Mehling H. Determination of enthalpy-temperature curves of phase change materials with the T-history method—improvement to temperature dependent properties *Meas. Sci. Technol.* 14 184–9. 2003

[13] Marín M. J., Lázaro A, Zalba B. New installation at the university of Zaragoza (Spain) of T-History method to measure the thermal properties. In: Proceed-ings of the 8th workshop annex 17, ECES, IEA; 2005.

[14] Rady M. A., Arquis E., Le Bot C. “Characterization of granular phase changing composites for thermal energy storage using the T-history method”, *International Journal of Energy Research*, 34, pp. 333-344. 2009.

[15] Mazo, J., Delgado, M., Lázaro, A., Dolado, P., Peñalosa, C., Marin, M. J., Zalba, B. A theoretical study on the accuracy of the T-history method for enthalpy-temperature curve measurement: analysis of the influence of thermal gradients inside T-history samples. *Measurement Science and Technology*. 2015.

[16] Haurie L., Mazo J., Zalba B., Delgado M. Fire behaviour of a mortar with different mass fractions of phase change material for use in radiant floor systems. *Energy and Buildings* 84, 86–93. 2014.

[17] Churchill S.W. and Chu H.H.S., Correlating Equations For Laminar And Turbulent Free Convection From a Horizontal Cylinder, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 18, p-1049, 1975.

[18] http://www.leroymerlin.es/productos/electricidad/tubos_rigidos_y_flexibles/tubos_rigidos.html Fecha de última consulta: 08/11/2015.

[19] <http://www.mwmaterialsworld.com/es/caucho-goma/gomas/tubo-de-goma-silicona.html> Fecha de última consulta: 08/11/2015.

[20] Creus Solé, Antonio. Instrumentación industrial. 4ª edición, 1989. MARCOMBO, S.A.

[21] <http://es.omega.com/>
Fecha última revisión: 01/11/2015

[22] <http://www.tcdirect.es/default.aspx>
Fecha última revisión: 01/11/2015

[23] http://www.tcdirect.es/Default.aspx?level=2&department_id=180/22
Fecha última revisión: 01/11/2015

[24] http://www.tcdirect.es/Default.aspx?level=2&department_id=230/24
Fecha última revisión: 01/11/2015

[25] <http://es.omega.com/pptst/SA1XL.html>
Fecha última revisión: 01/11/2015

[26] <http://es.omega.com/pptst/SA1-RTD.html>
Fecha última revisión: 01/11/2015

[27] http://es.omega.com/pptst/SA2C_SA2F-RTD.html

Fecha última revisión: 01/11/2015

[28] http://es.omega.com/pptst/F1500_F2000_F4000.html

Fecha última revisión: 01/11/2015

[29] http://es.omega.com/pptst/EXGG-2CU_3CU_WIRE.html

Fecha última revisión: 01/11/2015

[30] http://www.tcdirect.es/Default.aspx?level=2&department_id=230/21

Fecha última revisión: 01/11/2015

[31] <http://es.omega.com/pptst/PR-10.html>

Fecha última revisión: 01/11/2015

[32] Incropera F.P., Dewitt D.P., Bergman T.L., Lavine A.S. "Fundamentals of Heat and Mass Transfer". 6th edition, 2007. John Wiley & Sons, Inc.

[33] <http://www.vidrasa.com/>

Fecha de última revisión: 11/11/2015

[34] Norma UNE-EN 12390-2:2009. Ensayos de Hormigón endurecido. Parte II: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia. AENOR, 2009. Fecha de última revisión: 08/11/2015.

Nomenclatura

| | |
|----------------|--|
| A | área [m ²] |
| c _p | calor específico a presión constante [J/kg·K] |
| D | diámetro [m] |
| DSC | Calorimetría diferencial de barrido |
| e | error |
| e | espesor [m] |
| g | aceleración de la gravedad [m/s ²] |
| h | coeficiente de transferencia de calor [W/m ² ·K] |
| h _m | entalpía asociada al cambio de fase sólido-líquido [J/kg] |
| L | longitud [m] |
| m | masa [kg] |
| q | flujo de calor [W/m ²] |
| R | resistencia eléctrica [ohmios, Ω], resistencia térmica [K·m ² /W] |
| R | radio [m] |
| t | tiempo [s] |
| T | temperatura (absoluta en K, diferencias en °C o K) |
| T _m | temperatura de cambio de fase [K] |
| U | coeficiente global de transferencia de calor [W/m ² ·K] |

Letras griegas

| | |
|---|--|
| α | difusividad térmica [m ² /s] |
| ε | emisividad |
| λ | conductividad térmica [W/m·K] |
| ν | viscosidad cinemática [m ² /s] |
| ρ | densidad [kg/m ³] |
| β | coeficiente de expansión térmica [°C ⁻¹] |

σ constante de Stefan-Boltzmann

Subíndices

a ambiente

cond conducción

conv convección

int integración método de Marín et al. [

l líquido

med medida

mr media radiante

p PCM

rad radiación

r referencia

s sólido

w agua

∞ zona alejada de superficie

o inicial

t tubo

Números adimensionales

Bi número de Biot

Nus número de Nusselt

Pr número de Prandtl

Ra número de Rayleigh

Correlaciones

$$C_{r,PCM} = \frac{m_{PCM} \cdot c_{p,PCM}}{m_{PCM} \cdot c_{p,PCM} + m_t \cdot c_{p,t}}$$

$$C_{r,ref} = \frac{m_{ref} \cdot c_{p,ref}}{m_{ref} \cdot c_{p,ref} + m_t \cdot c_{p,t}}$$

$$R_t/R_{c-r} = \frac{\lambda_t}{h \cdot e}$$

Anexos

Anexo - I: Conceptos previos

Este anexo contiene una introducción a los sistemas de almacenamiento térmico de energía en edificios. En el primer apartado, se explica brevemente en qué consisten los materiales de cambio de fase (phase change material, en adelante PCM), así como sus aplicaciones. En el segundo apartado, se describe el método T-History utilizado para la determinación de la curva entalpía-temperatura. Finalmente, en el último apartado se recogen las conclusiones que sitúan en contexto y justifican el interés de este TFG.

I. 1. Almacenamiento térmico de energía en edificios con materiales de cambio de fase

En el mundo se consumen grandes cantidades de combustibles fósiles, lo que ha provocado el efecto invernadero y el rápido agotamiento de éstos. En la Unión Europea, el sector de la construcción es el mayor consumidor de energía con alrededor del 40% de la energía total consumida ([European Union \[1\]](#)), gran parte de esta energía está directamente relacionada con la climatización de los edificios. Una acción que puede ayudar a disminuir la cantidad de energía consumida globalmente es mejorar la eficiencia energética de los edificios.

En los últimos años, los sistemas de almacenamiento de energía han ganado importancia en aplicaciones constructivas permitiendo reducir los picos de consumo de energía y el rango de fluctuación de temperaturas proporcionando un entorno con mayor confort.

Dentro de este campo, una tecnología que se ha desarrollado durante la última década son los PCMs, que utilizan el principio de almacenamiento térmico de energía.

I. 1. 1. Almacenamiento térmico de energía

Los PCMs toman su nombre de su mecanismo de acción.

Se suele hablar de material de cambio de fase como aquél que experimenta un cambio de estado sólido-líquido-gaseoso, con las condiciones adecuadas¹ para poder usarlo en aplicaciones de almacenamiento térmico de energía. El interés de este tipo de materiales radica en que la temperatura de cambio de fase se mantiene aproximadamente constante mientras el material continúa intercambiando energía, siendo la cantidad de energía latente mayor que si se intercambiase solo calor sensible, lo que supone un sistema eficiente de almacenamiento térmico de energía [\[2\]](#).

Cuando a un sólido se le suministra energía, va aumentando su temperatura hasta alcanzar un cierto punto en el cual los enlaces entre las moléculas comienzan a

¹ Temperatura de cambio de fase en el rango de temperaturas de confort de la habitación, alta entalpía de cambio de fase, estabilidad química y térmica, bajo cambio volumétrico en el cambio de fase.

romperse. Mientras, el material continúa absorbiendo calor en un proceso endotérmico, produciéndose el cambio de sólido a líquido [3].

Igualmente, cuando la temperatura disminuye, el material cede la energía de cambio de fase (o energía latente) y regresa a estado sólido. Este intercambio de energía, si se selecciona adecuadamente el material, se puede producir a la temperatura de confort de la habitación.

En la [figura 1.1.](#), se puede observar como varía la temperatura de un material conforme a la energía suministrada. El gráfico se puede dividir en tres partes:

- 1ª. La temperatura del sólido aumenta proporcionalmente a la energía suministrada.
- 2ª. La temperatura se mantiene constante mientras se sigue produciendo un aumento de la energía. Esto es debido a que el material utiliza esa energía en el cambio de fase, por tanto, está absorbiendo energía.
- 3ª. La temperatura del líquido aumenta proporcionalmente a la energía suministrada.

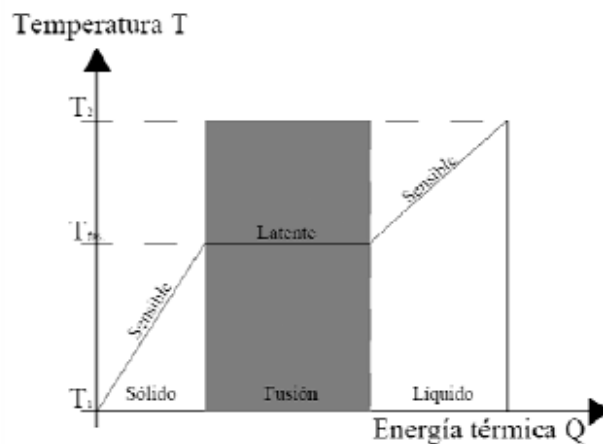


Figura 1.1.

Gráfico energía térmica frente a temperatura para el cambio de fase de una sustancia pura [2]

La energía que puede absorber el material durante el cambio de fase se conoce como entalpía de fusión o de cambio de fase

I. 1. 2. Clasificación de los materiales de cambio de fase (PCM)

Existen diversos tipos de materiales que pueden ser utilizados como PCM. La forma más usual de clasificar estos materiales es según su naturaleza.

En 1983, [Abhat \[4\]](#) elaboró una clasificación de los materiales utilizados para sistemas de almacenamiento térmico de energía (TES), [figura 1.2.](#) Atendiendo a esta clasificación, se pueden distinguir entre materiales de cambio de fase de origen orgánico o de origen inorgánico.

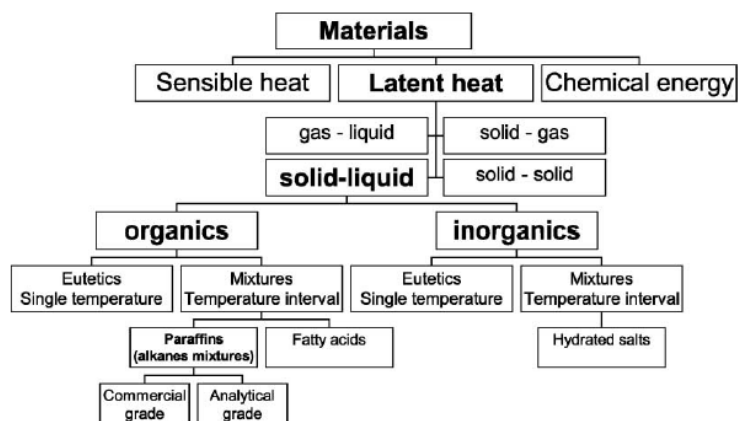


Figura 1.2.

Clasificación de los materiales de almacenamiento de energía [4]

Posteriormente, [Rathod and Banerjee \[5\]](#) modificaron la clasificación de materiales usados como PCM ([figura 1.3.](#)), realizando una distinción entre origen orgánico, inorgánico y eutéctico.

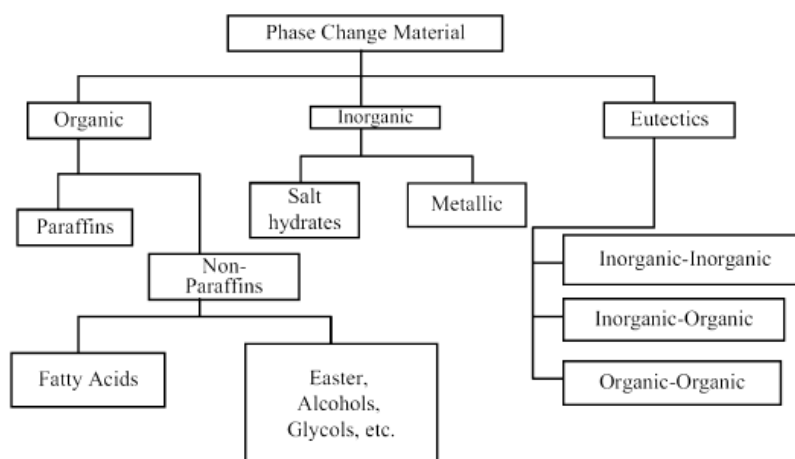


Figura 1.3.

Clasificación general de PCM [5]

La [figura 1.4.](#) muestra el rango de temperaturas y entalpías de fusión para los materiales más comunes usados como PCM.

Asimismo, en la [tabla 1.1.](#) se muestra una comparación de las distintas propiedades de materiales de cambio de fase. Como puede observarse, muchos de los campos de los PCM de origen eutéctico no se han completado, debido a que la determinación de las propiedades termofísicas de éstos aún se encuentra en estudio [3].

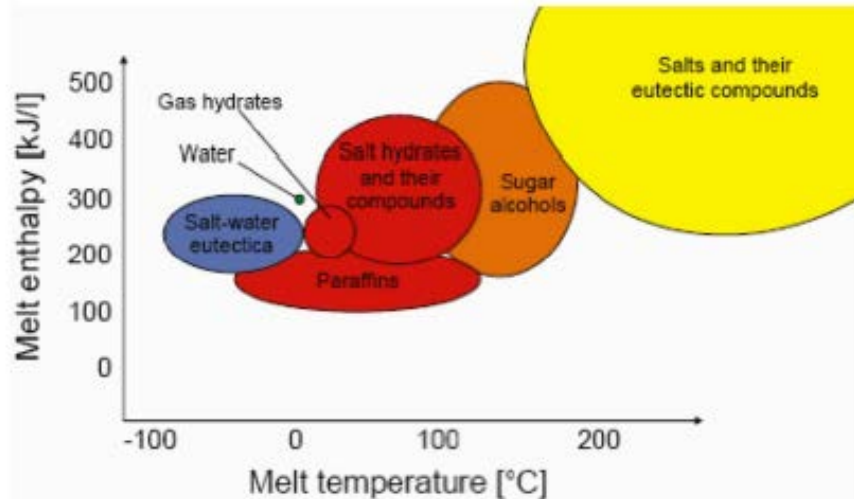


Figura I.4.

Relación temperatura de fusión-entalpía de fusión para varios materiales usados en PCM [14]

Tabla I.1.

Comparación de propiedades de PCM, elaboración propia en base a [3], [15]

| Propiedad | Origen del PCM | | |
|---|--|--|---|
| | Orgánico | Inorgánico | Eutéctico |
| Conductividad térmica | Baja | Más elevada que PCM orgánicos | Puede ser adaptada según especificaciones |
| Estabilidad química y térmica | Estable, compatible con elementos de construcción convencionales | Segregación de fase, falta de estabilidad térmica. Necesidad de aditivos | - |
| Sub-enfriamiento | Bajo o nulo | Sí | - |
| Comportamiento al fuego | Inflamables | No inflaman | - |
| Corrosividad | No corrosivos | Corroen con metales | - |
| Temperaturas de fusión | Amplio rango de temperaturas | Medias | Elevadas |
| Comportamiento ecológico | Reciclable | Biodegradable | - |
| Cambio de volumen durante el cambio de fase | Mayor | Menor | - |
| Entalpía de fusión | Menor | Mayor | Puede ser adaptada según especificaciones |
| Coste | Medio-Alto | Bajo | Alto |

1. 1. 3. Técnicas de integración de PCM

Como anteriormente se ha descrito, debido al principio de funcionamiento de los PCM, éstos cambian a fase líquida durante su periodo de absorción de energía. Este hecho provoca que sea necesaria la encapsulación del material de cambio de fase en aplicaciones de construcción, para evitar problemas como la migración de PCM en la superficie del material o la difusión de líquidos de baja viscosidad a lo largo del material ([Özonur et al. \[17\]](#)).

Actualmente, se utilizan dos métodos de encapsulamiento: micro y macro encapsulamiento.

La micro-encapsulación implica el embalaje del PCM en cápsulas de tamaño menor de 1 μm . hasta 300 μm . ([Hawlander et al. \[18\]](#)). El producto final consiste en una esfera llena de PCM en el centro y recubierta de una membrana ([figura 1.5.](#)). Los materiales usados para encapsulamiento no deben reaccionar con el PCM, ni mostrar signos de deterioro con el tiempo, suelen ser polímeros de origen orgánico o sílice.



Figura 1.5.

Modelo de PCM microencapsulado [5]

La macro-encapsulación se refiere a PCM incluidos en algún tipo de contenedor como pueden ser tubos, esferas o paneles que pueden ser incorporados en materiales de construcción o servir como intercambiadores de calor ([figura 1.6.](#)). El tamaño de estos recipientes suele ser mayor de un 1 cm.

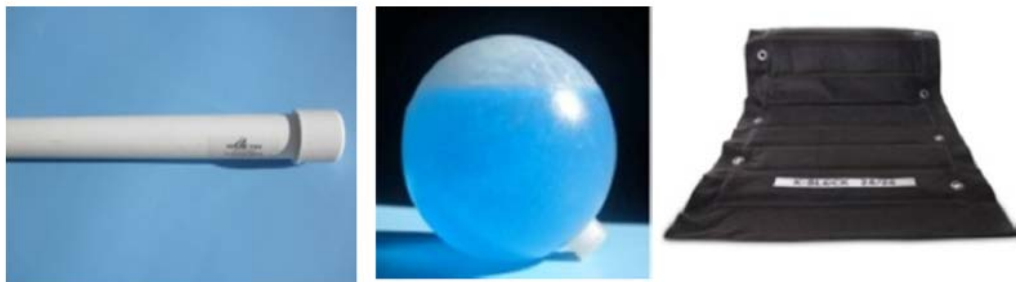


Figura 1.6.

Ejemplos de PCM macro-encapsulados ([RGEES \[20\],\[21\]](#); [Salca \[22\]](#))

En la [tabla I.2.](#) se muestran las ventajas e inconvenientes de ambos métodos.

Tabla I.2.

Descripción de las ventajas e inconvenientes de los métodos de encapsulamiento de PCM, elaboración propia en base a [

| Micro-encapsulado | | Macro-encapsulado | |
|--|---|-------------------------------------|---|
| Ventajas | Inconvenientes | Ventajas | Inconvenientes |
| - Se incrementa la superficie de intercambio de calor produciendo un incremento en el calor transferido. | -Añadir micro-cápsulas afecta a la resistencia de los materiales. | - Mayor cantidad de PCM encapsulado | - Tendencia a la solidificación/fusión del PCM de los bordes ralentizando la absorción y devolución de energía. |
| - Se reduce la reactividad con materiales del entorno | -Se produce una disminución de la energía térmica latente capaz de almacenar por unidad de volumen y masa debido a la adicción del material de encapsulamiento. | | -Dificultad de integrar en la estructura de las construcciones ya que se debe proteger contra perforaciones. |
| - Los cambios de volumen no afectan a la estructura que le rodea | | | -Mayor coste |
| - Se puede añadir directamente a materiales de construcción como cemento o yeso. | | | |

1. 1. 4. Materiales compuestos con PCM utilizados en la construcción

Gracias al avance de las técnicas de integración de PCM, se han desarrollado materiales compuestos por productos de construcción como yeso, materiales plásticos o cemento y PCM. A continuación se detallan brevemente algunos de estos compuestos.

Compuestos de PCM y yeso

En esta tecnología de aplicación de los PCM, éstos forman un material compuesto con el yeso tradicional que forma las paredes. Para lograr la incorporación del material de

cambio de fase se utilizan tres métodos: incorporación directa, impregnación o PCM microencapsulado.

Sin embargo, las dos primeras técnicas de incorporación mencionadas poseen el problema de la migración de PCM. Este hecho se soluciona utilizando la microencapsulación.

Todas las técnicas mencionadas permiten la incorporación de aproximadamente el 20 % - 25 % en masa del material de cambio de fase al material constructivo convencional.

En la [tabla 1.3](#), se muestran las propiedades de generales de los compuestos de PCM y yeso.

Tabla 1.3.
Propiedades generales de los compuestos de PCM y yeso [7]

| PCM utilizado | Parafinas, Ácidos grasos y PCM microencapsulado |
|--|---|
| % (masa) PCM | 20-25% |
| $\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ | 900 |
| $h_m \left[\frac{kJ}{kg} \right]$ | 25-40 |
| $\lambda \left[\frac{W}{(m \cdot K)} \right]$ | 0.2 |

Compuestos de PCM y materiales plásticos

En este tipo de compuestos el PCM puede incorporarse al material plástico sin encapsular, o por el contrario, puede aplicarse la técnica de microencapsulación.

El material resultante de la primera de las opciones anteriores se denomina Shape Stabilized PCM (SSPCM). En este compuesto, el material de cambio de fase se encuentra embebido en la matriz polimérica ([figura 1.7](#)). El resultado es un material de consistencia siempre sólida con altos porcentajes en masa de contenido de PCM, entre el 60 y 80 % [7]. La principal desventaja de estos materiales es la resistencia al fuego, ya que se trata de materiales inflamables.

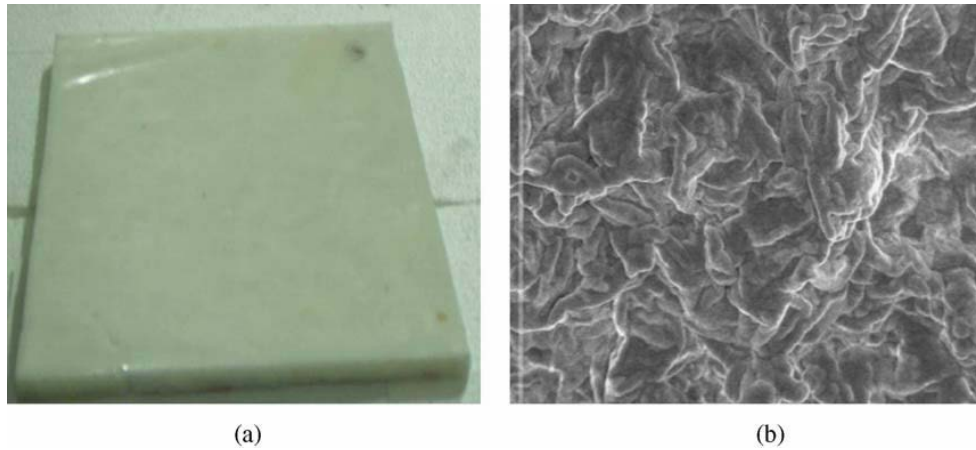


Figura 1.7.

(a) Fotografía de una placa de SSPCM (b) Imagen SEM del SSPCM [12].

Por otra parte, existe la adicción de PCM microencapsulado en matriz polimérica o con PVC. En ambos casos, se consiguen placas delgadas ([figura 1.8.](#)) para utilizarse en el recubrimiento de paredes y mejorar el confort en el interior de los edificios. Con estas técnicas se consiguen concentraciones en masa del PCM de 60 % y 45 % respectivamente.

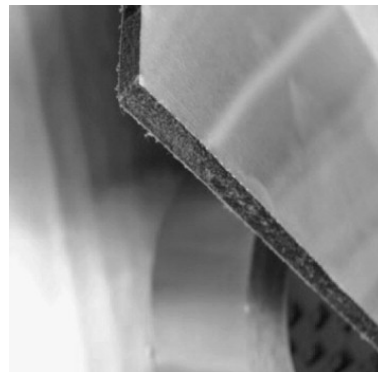


Figura 1.8.

Material de PCM en matriz polimérica [7]

En la [tabla 1.4.](#) se muestran las propiedades generales de los compuestos de PCM y plásticos.

Tabla 1.4.

Propiedades generales de los compuestos de PCM y plásticos [7]

| Compuesto | % PCM | ρ $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$ | h_m $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$ | λ $\left[\frac{W}{(m \cdot K)}\right]$ |
|--|--------|--------------------------------------|------------------------------------|--|
| SSPCM: Poliétileno de alta densidad con PCM | 60-80% | 950 | 90-150 | 0.3 (sol.) 0.2 (liq.) |
| Lámina de PVC con PCM | 20-45% | - | 18-87 | 0.24-0.12 |

Compuestos de PCM y cemento

La bibliografía consultada recoge distintas técnicas de obtención de materiales compuestos por cemento y PCM. A continuación se describen brevemente estas técnicas.

- PCM añadido por impregnación

La adición de PCM directamente en hormigón proporciona ventajas con respecto al material constructivo sin aditivos como son una baja conductividad térmica y un incremento en la inercia térmica en determinadas temperaturas. Sin embargo, este compuesto muestra algunas propiedades no deseadas como son una disminución de la resistencia, baja resistencia al fuego e incertidumbre de estabilidad térmica con el paso del tiempo debido a problemas como la posible migración [23].

Las proporciones en masa logradas con esta técnica están entre el 4 y 8.5 %

- Hormigón con PCM microencapsulado

En esta técnica el PCM microencapsulado se incorpora al hormigón para mejorar las propiedades térmicas. Mediante la encapsulación del PCM se evita el problema de la migración.

La conformación de este material es similar al de un hormigón convencional. Sin embargo, hay que prestar atención a la miscibilidad del PCM con el resto de materiales, siendo necesario estudiar el orden de mezcla de los componentes, la necesidad de emplear un aglutinador, etc. [7]

Además, [Cabeza et al. \[24\]](#) estudiaron este tipo de compuestos, demostrando que mantienen unas propiedades mecánicas aceptables, 25 MPa a compresión y 6 MPa a flexión, sin diferencias en los efectos que proporciona el PCM después de 6 meses de operación.

En la [tabla I.5.](#) se muestran las propiedades generales de los compuestos de cemento y PCM.

Tabla I.5.
Propiedades generales de los compuestos de cemento y PCM

| Compuesto | % PCM | $h_m \left[\frac{kJ}{kg} \right]$ | $\lambda \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$ |
|-------------------------------------|-------|------------------------------------|--|
| PCM añadido por impregnación | 4-8.5 | - | - |

| | | | |
|--|-----------|------------|----------|
| Hormigón con PCM microencapsulado | 5% | 5.5 | - |
|--|-----------|------------|----------|

1. 1. 5. Aplicaciones de los PCM en edificación

Existen numerosos ejemplos de aplicaciones en edificación de los materiales compuestos con PCM. En general, se pueden distinguir dos estrategias de aplicación de éstos; utilizando el PCM en elementos pasivos de edificios como las paredes, ya sean interiores o fachada, o formando parte de elementos activos de climatización integrados en la construcción como pueden ser las superficies radiantes (suelos, paredes y techos).

A continuación se explican brevemente algunos ejemplos de estas aplicaciones.

PCMs en aplicaciones pasivas

Los materiales de cambio de fase están integrados en el recubrimiento del edificio con los materiales convencionales de construcción como yeso, hormigón o polímeros.

De esta manera, la energía térmica se acumula en las paredes logrando aumentar la inercia térmica del edificio y por tanto, disminuyendo la fluctuación diaria de temperaturas en el interior del edificio mediante su absorción o liberación.

En estos sistemas el intercambio de energía térmica se realiza de forma natural, es decir, sin ningún sistema adicional de circulación de aire o agua. La transferencia de calor se producirá mediante convección natural, conducción y radiación. Debido a esto y a la baja conductividad que poseen los materiales de cambio de fase [25], los flujos de calor del sistema serán reducidos y la dinámica del sistema lenta [Javi].

Por tanto, la energía almacenable de estos sistemas está limitada por la lenta transferencia de calor. Es decir, existe una cantidad límite de PCM por encima de la cual no se conseguirá ninguna mejoría del sistema, ya que el ciclo de carga y descarga del material de cambio de fase no llegará a completarse [3].

PCMs en aplicaciones activas

En estos sistemas la capacidad de almacenamiento de energía de los materiales de cambio de fase puede ser integrada en elementos activos como son las superficies radiantes.

A continuación se explican brevemente algunos ejemplos de integración de PCMs en aplicaciones activas.

- *Suelo radiante eléctrico con placas de SSPCM [26, 27]*

El objetivo principal de este sistema es desplazar el consumo eléctrico a las horas valle.

Como puede observarse en la [figura I.9](#), el sistema es de parquet flotante, es decir, existe un hueco de aire entre la superficie de madera y la placa de PCM, aumentando de manera considerable la resistencia térmica del conjunto. Además, el sistema de calefacción es de resistencias eléctricas.

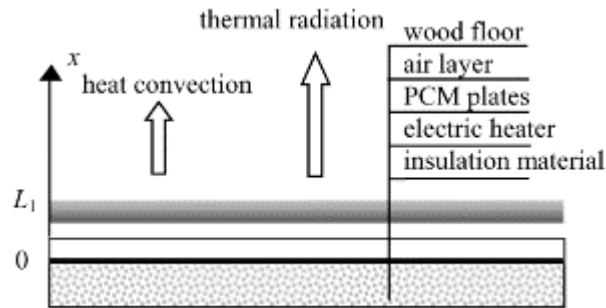


Figura I.9.

Sistema de suelo radiante eléctrico con placas de SSPCM [26]

El sistema eléctrico se acciona por la noche cuando la temperatura del PCM desciende por debajo de un determinado valor y se para cuando el PCM cambia de fase, es decir, la carga del material se produce durante la noche y durante el día se produce la descarga de la energía acumulada.

- *Sistema de refrigeración mediante suelo frío con circulación de aire* [23]

Al igual que en el caso anterior, el objetivo principal del sistema consiste en trasladar los consumos energéticos a horas valle.

Este sistema consta de espacio vacío en el suelo por donde el aire es introducido al local. Posteriormente, hay situado un lecho de PCM granulado con el que intercambia energía térmica. De esta manera, el aire debe atravesar la capa de PCM antes de entrar en la habitación. En la [figura I.10](#), se muestra el esquema de la estructura del suelo.

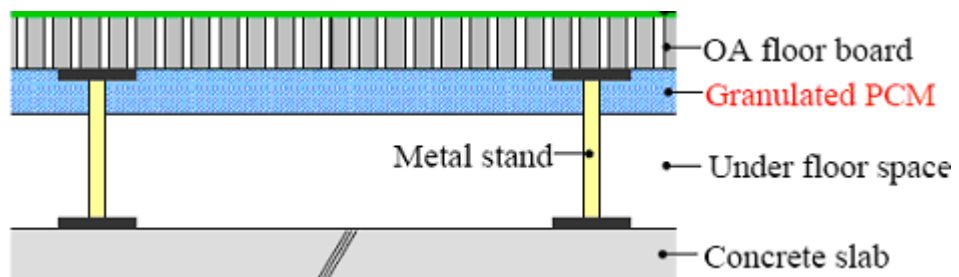


Figura I.10.

Esquema de la estructura del suelo [23]

Este sistema consta de dos modos de funcionamiento ([figura I.11](#)):

- Durante la noche, el aire frío producido recircula debajo del suelo almacenando la energía en el PCM.

- Durante el día, el aire atraviese el lecho de PCM accediendo al interior del local.

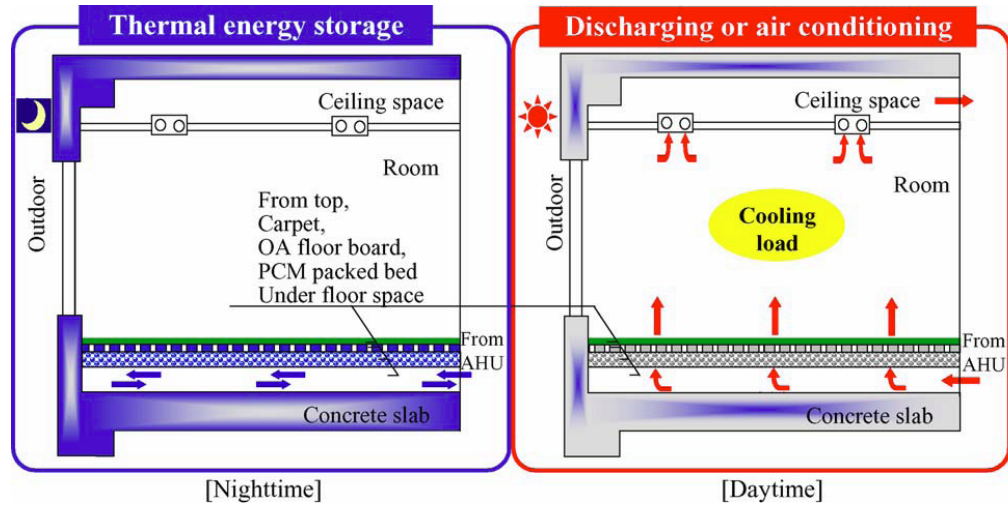


Figura I.11.

Modos de funcionamiento del sistema de refrigeración con lecho de PCM [23]

Los resultados de esta aplicación fueron bastante positivos consiguiendo trasladar toda la producción de frío demandada durante el día a horas nocturnas.

1. 1. 6. Simulación de PCMs para la evaluación energética de edificios

La simulación de los PCMs ofrece ciertas dificultades en su introducción en el campo de la evaluación energética de edificios, derivadas fundamentalmente de su comportamiento no lineal en el cambio de fase.

En general, existen diversos procedimientos para la resolución de problemas de conducción del calor transitorio en sólidos. Las más utilizadas en el análisis térmico de edificios son el uso de funciones de transferencia y métodos de elementos finitos.

El primero de los procedimientos de resolución es utilizado en la mayoría de los programas de simulación de edificios debido a su sencillez (Energy Plus, TRNSYS). Sin embargo, en el caso de los materiales de cambio de fase no es aplicable, ya que en torno a la temperatura de transición, su capacidad calorífica sufre fuertes variaciones frente a la temperatura. Esto ocasiona que la ecuación de transferencia de calor deje de poseer las deseables propiedades de linealidad [7]. En la [figura I.12](#) se muestra de forma gráfica esta incompatibilidad entre el algoritmo de las funciones de transferencia y el cálculo de la conducción del calor de un PCM, en este caso, se muestra el incumplimiento de una de las condiciones necesarias para la aplicación del método: 'Estímulos proporcionales producen salidas proporcionales'.

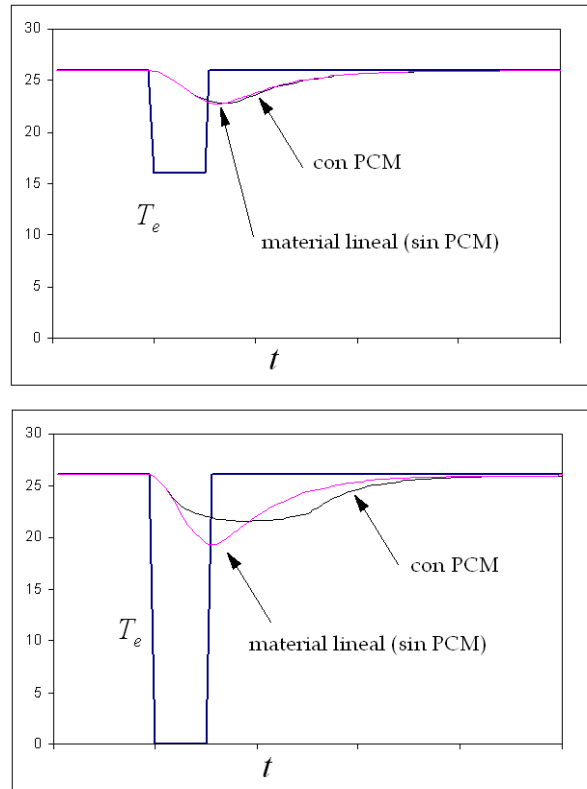


Figura I.12.

Incompatibilidad entre el método de funciones de transferencia y la simulación de PCM [7]

Ante la imposibilidad de aplicar el método de funciones de transferencia, surge la necesidad de plantear un esquema de resolución numérico que no posea dificultad en manejar las no linealidades. Lo más apropiado son los métodos de elementos finitos.

En este segundo método de resolución, la modelización del material de cambio de fase se realiza por el método de la entalpía y se desprecia o se engloba en una conductividad efectiva (si PCM está macroencapsulado) la convención del material en estado líquido. Por tanto, la ecuación en diferencias (ec. 1) a resolver en todos los casos queda como:

$$\rho \cdot \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad [\text{ec. 1}]$$

Obviamente, para la resolución de esta ecuación es necesario el conocimiento de la curva entalpía-temperatura del material de cambio de fase.

Debido a esto, surge la necesidad de emplear un método experimental que permita determinar la curva entalpía-temperatura y la función que relaciona la conductividad térmica con la temperatura de materiales de construcción compuestos con PCM.

1. 2. Determinación de la curva entalpía vs temperatura

Inicialmente, las propiedades termofísicas de los PCMs fueron determinadas mediante el uso de técnicas de análisis térmico [27]. Dentro de este grupo y quizá los más empleados, se encuentran los métodos de calorimetría diferencial de barrido (“differential scanning calorimetry”, DSC) y análisis térmico diferencial (“differential thermal analysis”, DTA) [28]. Sin embargo, pese a ser técnicas bien desarrolladas, poseen diversas limitaciones en la caracterización de PCMs. Debido a esto, Yingping et al. [29] propuso el método T-History para la determinación de la curva entalpía-temperatura. Este método se detalla en los siguientes apartados.

1. 2. 1. Método T-History

1. 2. 1. 1. Descripción del modelo original

Esta técnica permite obtener la curva entalpía-temperatura de varias muestras de PCM simultáneamente.

La instalación usada en este método se muestra en la [figura I.13](#). Varios tubos (uno o más) contienen la muestra de PCM, mientras que otro de los tubos contiene el material de referencia, que debe ser una sustancia de propiedades termofísicas conocidas. La instalación también consta de un sistema de adquisición de datos (data logger system), donde se registra la historia de temperaturas durante el calentamiento/enfriamiento de las muestras y la referencia.

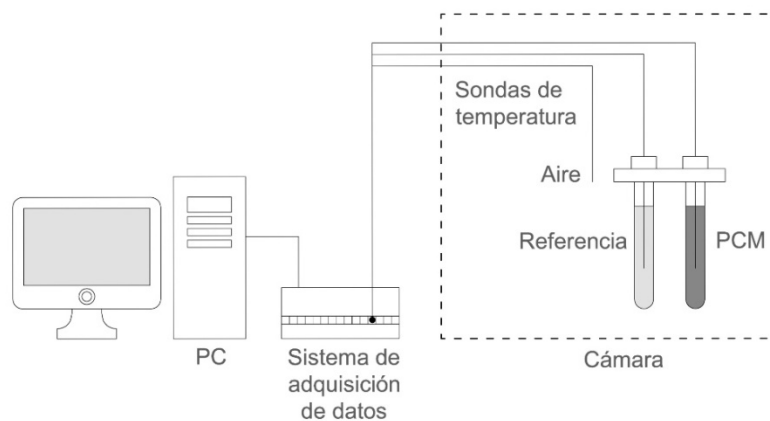


Figura I.13.
Instalación T-History [7]

Inicialmente, se parte de dos muestras a una temperatura T_0 . Posteriormente, la muestra y la referencia son expuestas a temperatura ambiente (T_∞), originándose un cambio de temperatura. Durante el calentamiento/enfriamiento, las temperaturas de la muestra y la referencia son registradas en función del tiempo, obteniéndose las curvas del método T-History. En la [figura I.14](#) y la [figura I.15](#) se muestran el proceso de enfriamiento registrado para un PCM y para el material de referencia respectivamente.

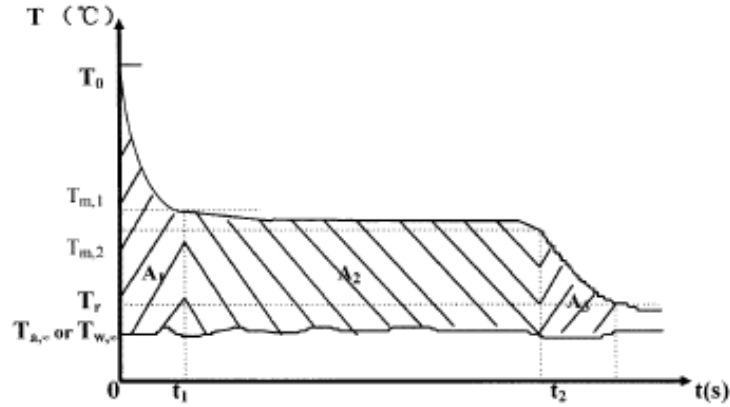


Figura 1.14.

Curva T-History de un PCM durante un proceso de enfriamiento (sin subenfriamiento) [29]

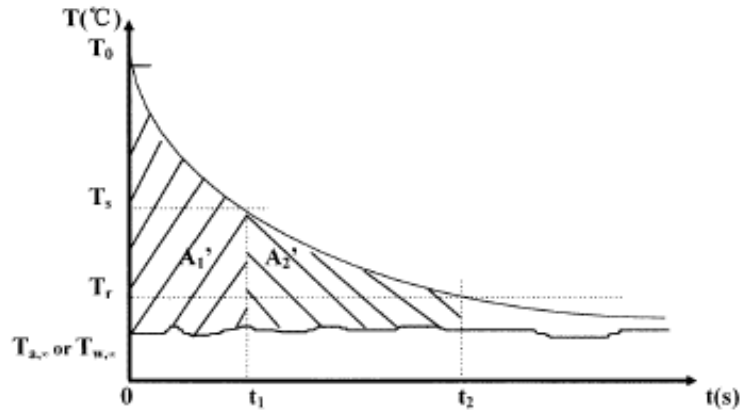


Figura 1.15.

Curva T-History del material de referencia en este caso agua durante un proceso de enfriamiento [29]

Comparando la curva obtenida para el PCM y el material de referencia, y aplicando un modelo matemático de transferencia de calor, es posible determinar la capacidad calorífica, c_p y la entalpía, h , del PCM a partir de la capacidad calorífica conocida del material de referencia.

Cuando se cumple $Bi < 0,1$ (número de Biot, $Bi = hR/(2\lambda)^2$ siendo R el radio del tubo, λ la conductividad térmica del PCM y h el coeficiente de transferencia de calor entre el tubo y el aire) y, por tanto, se puede analizar como sistema de capacidad [32].

Así, aplicando el balance de energía asociado con la variación de temperatura entre la temperatura de comienzo del ensayo (T_o) y la temperatura de comienzo del cambio de fase (T_s) para el PCM, se obtiene la ecuación 2:

$$(m_t c_{p,t} + m_p c_{p,l})(T_o - T_s) = hA_c \int_0^{t_1} (T - T_\infty) dt = hA_c A_1 \quad [\text{ec. 2}]$$

² Se advierte al lector que para los cálculos realizados en este TFG el número de Biot empleado ha sido $Bi = hR/\lambda$, ya que supone una relación más restrictiva.

El balance de energía durante el cambio de fase del PCM puede ser expresado como:

$$m_p h_m = h A_c \int_{t_1}^{t_2} (T - T_\infty) dt = h A_c A_2 \quad [\text{ec. 3}]$$

El balance de energía para el PCM asociado a la variación de temperatura entre la temperatura de final de cambio de fase (T_s) y la temperatura de final de ensayo (T_r) se expresa como:

$$(m_t c_{p,t} + m_p c_{p,s})(T_s - T_r) = h A_c \int_{t_2}^{t_3} (T - T_\infty) dt = h A_c A_3 \quad [\text{ec. 4}]$$

De igual manera, para la referencia se pueden plantear los balances de energía correspondientes a la variación de temperaturas entre la temperatura de inicio del ensayo y la temperatura de cambio de fase del PCM ([ec. 5](#)), y a la variación de temperaturas entre la temperatura final de cambio de fase del PCM y la temperatura final del ensayo ([ec. 6](#)).

$$(m_t c_{p,t} + m_w c_{p,w})(T_o - T_s) = \int_0^{t_1'} (T - T_\infty) dt = h A_c A_1' \quad [\text{ec. 5}]$$

$$(m_t c_{p,t} + m_w c_{p,w})(T_s - T_r) = \int_{t_1'}^{t_2'} (T - T_\infty) dt = h A_c A_2' \quad [\text{ec. 6}]$$

Siendo:

| | |
|------------|--|
| h | coeficiente de transferencia de calor [W/m ² ·K] |
| m_t | masa del tubo [kg] |
| m_p | masa del PCM [kg] |
| m_w | masa del material de referencia [kg] |
| $c_{p,t}$ | capacidad calorífica del tubo [J/kg·K] |
| $c_{p,l}$ | capacidad calorífica del PCM líquido [J/kg·K] |
| $c_{p,s}$ | capacidad calorífica del PCM sólido [J/kg·K] |
| $c_{p,w}$ | capacidad calorífica del material de referencia [J/kg·K] |
| h_m | entalpía de fusión del PCM [J/kg] |
| T | temperatura [K] |
| T_o | temperatura al inicio del ensayo [K] |
| T_∞ | temperatura ambiente [K] |
| T_s | temperatura de cambio de fase [K] |
| T_r | temperatura al final del ensayo [K] |
| A_c | área del tubo en la que se produce la transferencia de calor [m ²] |

$A_1, A_2, A_3, A'_1, A'_2$ áreas encerradas por las curvas obtenidas en el registro de datos [K·s].

A partir de la [ecuación 5](#), es posible determinar h , el coeficiente de transferencia de calor del tubo que contiene el material de referencia con el entorno. De esta manera conteniendo el material de estudio en un recipiente con las mismas propiedades geométricas que el de la referencia el coeficiente de transferencia de calor puede ser considerado el mismo.

Por tanto, manipulando las ecuaciones anteriores se obtienen las expresiones para el cálculo de las capacidades caloríficas del PCM en estado sólido y líquido ([ec. 7](#) y [ec. 8](#) respectivamente) y para la entalpía de fusión, tanto para PCM con subenfriamiento como sin él ([ec. 9](#) y [ec. 10](#)).

$$C_{p,s} = \frac{m_w c_{p,w} + m_t c_{p,t}}{m_p} \frac{A_3}{A'_2} - \frac{m_t}{m_p} c_{p,t} \quad [\text{ec. 7}]$$

$$C_{p,l} = \frac{m_w c_{p,w} + m_t c_{p,t}}{m_p} \frac{A_1}{A'_1} - \frac{m_t}{m_p} c_{p,t} \quad [\text{ec. 8}]$$

$$H_m = \frac{m_w c_{p,w} + m_t c_{p,t}}{m_t} \frac{A_2}{A'_1} (T_o - T_s) \quad [\text{ec. 9}]$$

$$H_m = \frac{m_w c_{p,w} + m_t c_{p,t}}{m_t} \frac{A_2}{A'_1} (T_o - T_{m,1}) - m_t c_{p,t} \frac{(T_{m,1} - T_{m,2})}{m_p} \quad [\text{ec. 10}]$$

Con respecto a la técnica DSC, el método T-History posee diversas ventajas en la caracterización de PCMs. Entre ellas, la posibilidad de emplear muestras de mayor tamaño o la simplicidad de la instalación. En la [tabla 2.1](#), se comparan ambos métodos.

Un hecho a destacar del método T-History es que, hasta ahora, no está disponible comercialmente. Sin embargo, el método puede ser implementado usando componentes de laboratorio estándar.

Tabla 2.1.

Comparación entre métodos de análisis térmico [\[11\]](#)

| | DSC | T-History |
|----------------------------------|--|---|
| Tamaño de la muestra (mg) | 1-50 | 15.000 |
| Tiempo de medida (min) | 100 | 40 |
| Mantenimiento | ++ | + |
| Coste de equipo | ++ | + |
| Fenómenos | Fusión, transición vítrea, reacción (polimerización) | Fusión, cambio de fase visual, grado de subenfriamiento |
| Propiedades termofísicas | Cp f(T) h f(T) T _m | Cp f(T) h f(T) T _m λ |

1. 2. 1. 2. Mejoras del método T-History

Diversos autores han propuesto mejoras del método original T-History. Este documento se centra en las contribuciones realizadas por Marín et al. [31, 32].

Con respecto al proceso de enfriamiento de los tubos, en vez de exponer las muestras a temperatura ambiente, el proceso se realizó en una cámara aislada (figura I.16.). Dentro de la cámara, la temperatura durante el experimento varía menos de 1 °C y la estratificación de temperaturas vertical es despreciable.

Además, en el emplazamiento de los tubos, se propuso situar las muestras horizontalmente. De esta manera, los movimientos del sólido en el líquido debidos a efectos gravitacionales disminuyen, mejorando la precisión de los resultados obtenidos al aplicar el método T-History en un 15 % [32].

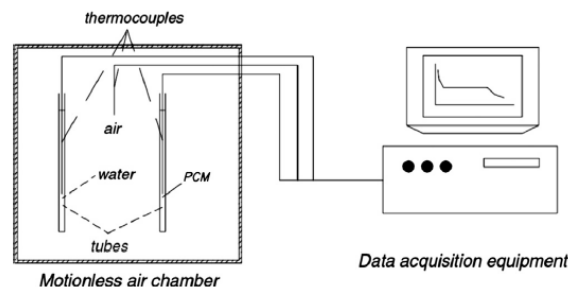


Figura I.16.

Instalación experimental propuesta por Marín et al. [31]

En cuanto a la mejora del modelo matemático, Zhang et al. [29] asume en el método original que $c_{p,s}$, $c_{p,l}$ y h_m no dependen de la temperatura siendo más adecuado para determinar las propiedades termofísicas de sustancias puras, ya que poseen una zona de cambio de fase bien definida. Sin embargo, la mayoría de las sustancias de interés industrial son no puras, no existiendo una transición brusca sino gradual en el cambio de fase entre la fase sólida y la fase líquida (figura I.17.). Por tanto, es más apropiado el uso de la entalpía y su relación con la temperatura para la caracterización de PCMs, buscando obtener las curvas entalpía-temperatura.

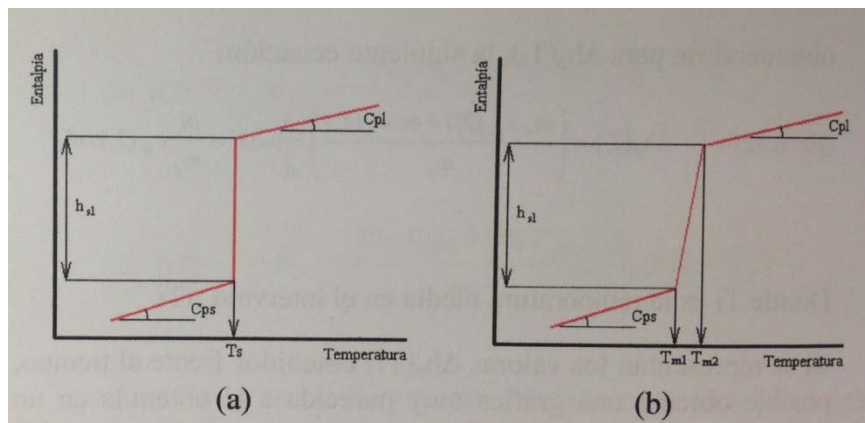


Figura I.17.

Curva teórica entalpía-temperatura para sustancias puras (a) y no puras (b) []

La mejora del modelo original consiste realizar el análisis del balance de energía, tanto a la muestra como a la referencia, para un salto de temperatura $\Delta T_i = T_{i+1} - T_i$ idéntico, que se corresponde con un intervalo de tiempo $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$, distinto para la muestra y la referencia. Por tanto, la [ecuación 10](#) correspondiente con el modelo original se modificaría obteniendo la [ecuación 11](#).

$$\Delta h_p(T_i) = \left(\frac{m_w c_{p,w}(T_i) + m_t c_{p,t}(T_i)}{m_p} \right) \frac{A_i}{A_i} \Delta T_i - \frac{m_t}{m_p} c_{p,t}(T_i) \Delta T_i \quad [\text{ec. 11}]$$

Aplicando la anterior ecuación anterior, es posible obtener la curva entalpía-temperatura ([figura I.18](#)).

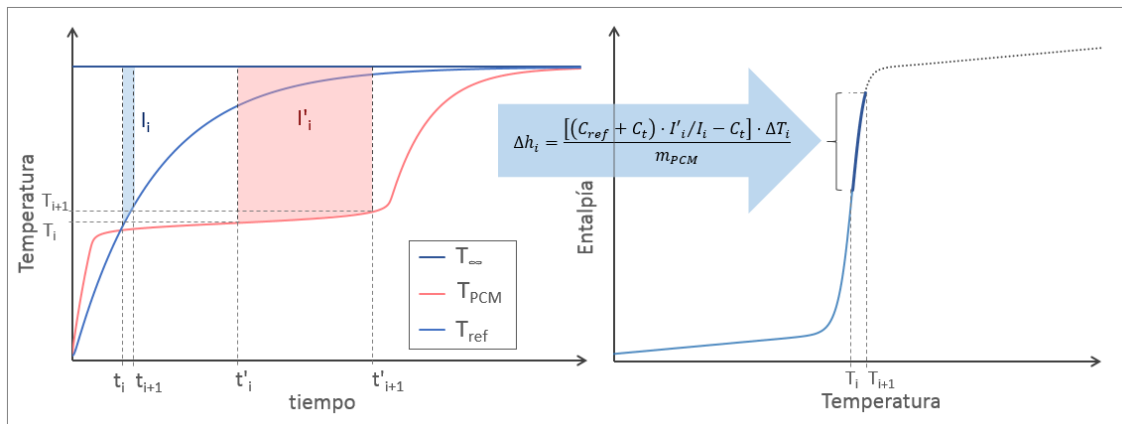


Figura I.18.

Representación gráfica del algoritmo de integración propuesto por Marín et al. [7]

Este tipo de curvas adquieren especial importancia cuando son usadas para la selección de materiales en sistemas de almacenamiento de energía, ya que el cambio de fase proporciona el calor total (sensible y latente) absorbido por el material en un rango de temperaturas registrado por el sistema de adquisición de datos.

Además, a partir de los datos de este gráfico, se puede calcular el calor específico del material en cada punto empleando la [ecuación 12](#).

$$c_p = \frac{\partial h}{\partial T} \quad [\text{ec. 12}]$$

1. 2. 1. 3. Verificación de la instalación

Como se ha comentado anteriormente, debido al hecho de que no existe una instalación del método T-History disponible comercialmente, ésta se puede configurar con materiales básicos de laboratorio. Por ello, sería necesario establecer un método para verificar el correcto funcionamiento de los instrumentos de la instalación y cuantificar las incertidumbres de las medidas.

[Lázaro et al. \[33\]](#) plantearon un método general para validar el correcto funcionamiento de la instalación en el rango de temperaturas para aplicaciones de construcción. En los siguientes párrafos se explica brevemente el procedimiento a seguir.

En este estudio se utilizó la instalación de T-History de ZAE-Bayern ([figura I.19.](#)). Esta instalación está diseñada para determinar las propiedades de PCMs en un rango de temperaturas entre -20 °C y 65 °C y permite una dimensión máxima de las muestras de entre 15 ml y 150 ml.

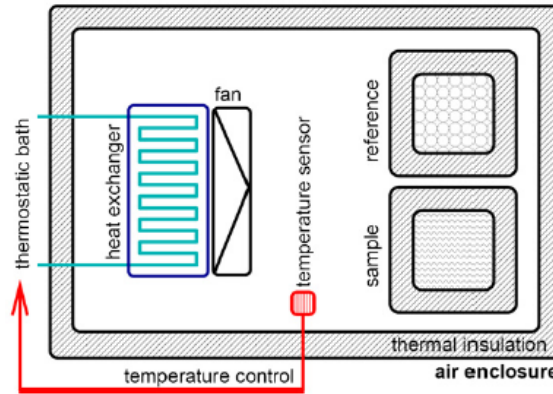


Figura I.19.

Esquema de instalación T-History de ZAE-Bayern [\[33\]](#)

Los resultados obtenidos del método T-History dependen fuertemente de la precisión de la temperatura registrada. Por tanto, es de gran importancia asegurar una correcta calibración de los sensores de temperatura. Así mismo, convendría realizar antes de cada medición una verificación del estado de las sondas.

Para verificar el estado de la instalación, se registran las temperaturas y se realiza el cálculo de la entalpía para sustancias con propiedades bien conocidas. Las curvas obtenidas del método se comparan con la curva teórica de la sustancia en cuestión.

Inicialmente, se sometieron a estudio tres sustancias puras como son Galio, Agua y Hexadecano con un punto de fusión de 29.8 °C, 0 °C, y 18.1 °C respectivamente. De esta manera, el rango de temperaturas utilizado para el estudio de PCMs está cubierto. En las figuras [I.20.](#), [I.21.](#) y [I.22.](#) se muestran las curvas obtenidas y su comparación con la curva teórica.

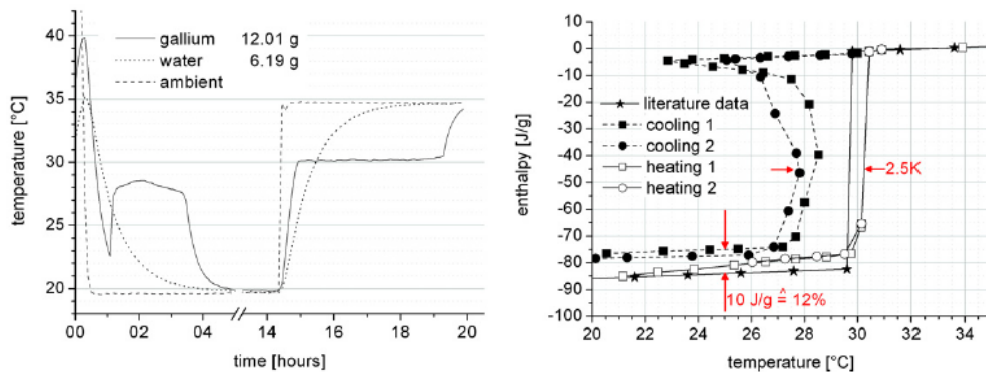


Figura I.20.

T-History del Galio utilizando Agua como referencia (izquierda). Curva h-T y curva teórica del Galio (derecha). [\[33\]](#)

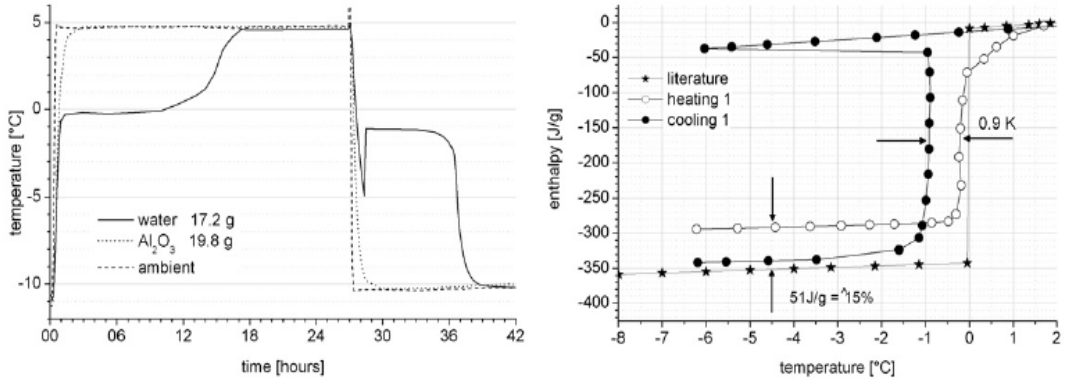


Figura I.21.

T-History del Agua utilizando Al_2O_3 como referencia (izquierda). Curva h-T y curva teórica del Agua (derecha). [33]

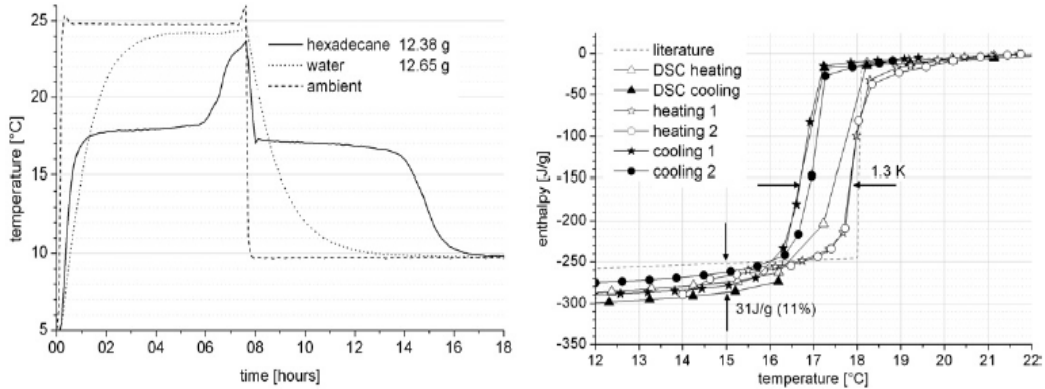


Figura I.22.

T-History del Hexadecano utilizando Agua como referencia (izquierda). Curva h-T y curva teórica del Hexadecano (derecha). [33]

Posteriormente, se eligen dos PCMs, en este caso RT27 y SAT-G. El procedimiento a seguir es el mismo que el utilizado con las sustancias puras. En las figuras 1.23. y 1.24. se muestran las curvas obtenidas y su comparación con la curva teórica.

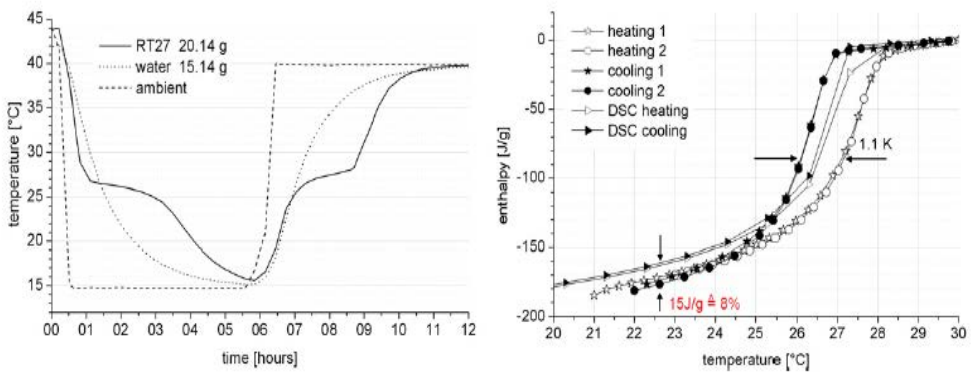


Figura I.23.

T-History del RT27 utilizando Agua como referencia (izquierda). Curva h-T y curva obtenida con el método DSC para la sustancia RT27 (derecha). [33]

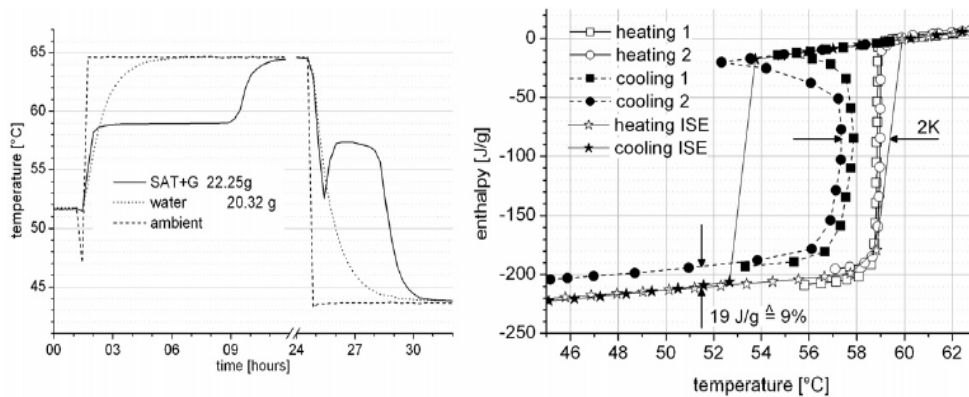


Figura 1.24.

T-History del SAT+G utilizando Agua como referencia (izquierda). Curva h-T y curva obtenida con el método DSC para la sustancia SAT+G (derecha). [33]

En la [tabla 1.7.](#), se muestran las máximas desviaciones para cada una de las sustancias que se utilizaron en la verificación de la instalación.

Tabla 1.7.

Máxima desviación entre los valores medidos y de referencia para la temperatura de cambio de fase y la variación de entalpía mostrados en los gráficos anteriores [\[33\]](#)

| Sustancia utilizada | Máxima desviación de la temperatura (K) | Desviación total de la entalpía (%) | Gráfico |
|---------------------|---|-------------------------------------|-----------|
| Galio | 2 | 12 | Figura 20 |
| Agua | 1 | 15 | Figura 21 |
| Hexadecano | 1.5 | 11 | Figura 22 |
| RT27 | 1.0 | 8 | Figura 23 |
| SAT+G | 4.5 | 9 | Figura 24 |

Los autores concluyeron que el método T-History es un método adecuado para la caracterización de materiales para aplicaciones de almacenamiento de energía. La precisión de la instalación es mejor para materiales no puros ya que en este caso, la instalación y el tratamiento de los datos estaba diseñado con este propósito.

1. 2. 1. 4. Análisis de la incertidumbre del método

Los autores que han estudiado el método [\[29, 33\]](#) han coincidido en señalar la importancia de la exactitud en la medida de la temperatura en las sondas de temperatura.

Yinping et al. [\[29\]](#) en la descripción del modelo original proporciona unas fórmulas para estimar la incertidumbre en el cálculo de la variación de la entalpía. Sin embargo, estas fórmulas no permiten la asignación del rango de incertidumbre a cada valor de entalpía

de la curva. Por ello, Mazo [7] propone un procedimiento para el cálculo de la propagación de incertidumbres a través del método T-History.

Inicialmente, se busca determinar la posible desviación en la medida de la sonda de temperatura considerando distintos niveles de temperatura. Para esto, se propone un modelo equivalente a la elaboración de una recta de calibración de la sonda a partir de las desviaciones obtenidas en los puntos T_1 y T_2 (límites del nivel de temperatura considerado). A partir de la [ecuación 13](#) se puede determinar la desviación mencionada.

$$\delta T(T) = \delta T_1 \cdot \frac{T_2 - T}{T_2 - T_1} + \delta T_2 \cdot \frac{T - T_1}{T_2 - T_1} \quad T \in [T_1, T_2] \quad [\text{ec. 13}]$$

Una vez definido el error en la medida de la temperatura, se procede a determinar su influencia sobre los cálculos del método. Para ello, se sustituye la expresión de la desviación de la temperatura medida en las ecuaciones para la determinación de la entalpía. Aplicando el desarrollo clásico de propagación de incertidumbres, se obtienen las expresiones para evaluar la sensibilidad de la medida de la variación de entalpía y del calor específico con respecto a cada parámetro. Estas expresiones se muestran en la [tabla I.8](#).

Tabla I.8.

Sensibilidad de la medida de variación de entalpía y calor específico respecto a los errores en la medida de temperatura del sensor [7]

| Variable | Sensibilidad $\Delta \hat{h}_{PCM} _{T_1, T}$ ($s_{\delta T_{i,j}} \cdot \delta T_{i,j}$) | Sensibilidad $\hat{c}_{p, PCM} _{T_1, T}$ ($s_{\delta T_{i,j}} \cdot \delta T_{i,j}$) |
|--------------------|---|---|
| $\delta T_{ref,1}$ | $-\left(1 + \frac{m_t \cdot \Delta h_t}{m_{PCM} \cdot \Delta h_{PCM}}\right) \cdot \frac{T_\infty - T_2}{T_\infty - \bar{T}_{ref} _{T_1, T}} \cdot \frac{\delta T_{ref,1}}{T_2 - T_1}$ | $-\left(1 + \frac{m_t \cdot c_{p,t}}{m_{PCM} \cdot c_{p,PCM}}\right) \cdot \frac{T_\infty - T_2}{T_\infty - \bar{T}_{ref} _{T_1, T}} \cdot \frac{\delta T_{ref,1}}{T_2 - T_1}$ |
| $\delta T_{ref,2}$ | $\left(1 + \frac{m_t \cdot \Delta h_t}{m_{PCM} \cdot \Delta h_{PCM}}\right) \cdot \frac{T_\infty - T_1}{T_\infty - \bar{T}_{ref} _{T_1, T}} \cdot \frac{\delta T_{ref,2}}{T_2 - T_1}$ | $\left(1 + \frac{m_t \cdot c_{p,t}}{m_{PCM} \cdot c_{p,PCM}}\right) \cdot \frac{T_\infty - T_1}{T_\infty - \bar{T}_{ref} _{T_1, T}} \cdot \frac{\delta T_{ref,2}}{T_2 - T_1}$ |
| $\delta T_{PCM,1}$ | $\left[\left(1 + \frac{m_t \cdot \Delta h_t}{m_{PCM} \cdot \Delta h_{PCM}}\right) \cdot \frac{T_\infty - T_2}{T_\infty - \bar{T}_{PCM} _{T_1, T}} - 1\right] \cdot \frac{\delta T_{PCM,1}}{T_2 - T_1}$ | $\left(1 + \frac{m_t \cdot c_{p,t}}{m_{PCM} \cdot c_{p,PCM}}\right) \cdot \frac{T_\infty - T_2}{T_\infty - \bar{T}_{PCM} _{T_1, T}} \cdot \frac{\delta T_{PCM,1}}{T_2 - T_1}$ |
| $\delta T_{PCM,2}$ | $\left[1 - \left(1 + \frac{m_t \cdot \Delta h_t}{m_{PCM} \cdot \Delta h_{PCM}}\right) \cdot \frac{T_\infty - T_1}{T_\infty - \bar{T}_{PCM} _{T_1, T}}\right] \cdot \frac{\delta T_{PCM,2}}{T_2 - T_1}$ | $-\left(1 + \frac{m_t \cdot c_{p,t}}{m_{PCM} \cdot c_{p,PCM}}\right) \cdot \frac{T_\infty - T_1}{T_\infty - \bar{T}_{PCM} _{T_1, T}} \cdot \frac{\delta T_{PCM,2}}{T_2 - T_1}$ |
| δT_{amb} | $\left(1 + \frac{m_t \cdot \Delta h_t}{m_{PCM} \cdot \Delta h_{PCM}}\right) \cdot \frac{(\bar{T}_{PCM} _{T_1, T} - \bar{T}_{ref} _{T_1, T}) \cdot \delta T_{amb}}{(T_\infty - \bar{T}_{PCM} _{T_1, T}) \cdot (T_\infty - \bar{T}_{ref} _{T_1, T})}$ | $\left(1 + \frac{m_t \cdot c_{p,t}}{m_{PCM} \cdot c_{p,PCM}}\right) \cdot \frac{(\bar{T}_{PCM} _{T_1, T} - \bar{T}_{ref} _{T_1, T}) \cdot \delta T_{amb}}{(T_\infty - \bar{T}_{PCM} _{T_1, T}) \cdot (T_\infty - \bar{T}_{ref} _{T_1, T})}$ |

Por otro lado, se obtienen unas expresiones simplificadas de tal manera que se obtenga una estimación del intervalo de error esperable en la estimación de varios parámetros: calor específico ([Ec. 14](#)), entalpía de cambio de fase ([Ec. 15](#)) y variación entalpía total medida en el ensayo ([Ec. 16](#)).

$$\frac{\delta(c_{p, PCM}|_{T_1, T_2})}{c_{p, PCM}|_{T_1, T_2}} \approx 2 \cdot \frac{\delta T}{T_2 - T_1} \cdot \left(1 + \frac{m_t \cdot c_{p,t}}{m_{PCM} \cdot c_{p,PCM}}\right) = 2 \cdot \frac{\delta T}{T_2 - T_1} \cdot \frac{1}{C_{r, PCM}} \quad [\text{Ec. 14}]$$

$$\frac{\delta(\Delta h_{PCM}|_{T_{m1}, T_{m2}})}{\Delta h_{PCM}|_{T_{m1}, T_{m2}}} \approx \sqrt{2} \cdot \frac{\delta T}{T_{m2} - T_{m1}} \quad [\text{Ec. 15}]$$

$$\frac{\delta(\Delta h_{PCM}|_{T_1, T_\infty})}{\Delta h_{PCM}|_{T_1, T_\infty}} \approx \sqrt{2} \cdot \frac{\delta T}{T_\infty - T_m} \cdot \left(1 + \frac{m_t \cdot \Delta h_t}{m_{PCM} \cdot \Delta h_{PCM}}\right) \quad [\text{Ec. 16}]$$

Además del error introducido por la medida de la sonda de temperatura, otro factor que se debe estudiar son los gradientes de temperatura en la muestra.

Mazo et al. [8] determina que los errores calculados en dirección radial no son despreciables, ya que la medida de la magnitud de entalpía de cambio de fase puede ser sobreestimada en un 10% si se mide la temperatura en el centro de la muestra, mientras que el error cometido en la determinación del calor específico puede ser de un 5%.

Debido a esto, Javier Mazo propone a partir de análisis teórico (numérico y analítico) de la transferencia de calor en dirección radial, unas relaciones para determinar el error cometido en las medidas del método T-History originado por los gradientes de temperatura en las muestras. Asimismo, proporciona unos límites para la acotación de estos errores. Estas expresiones se muestran en la [tabla I.9](#).

Tabla I.9.

Correlaciones y límites para los errores producidos en las medidas del método T-History [8]

| Correlaciones | Acotación de los errores |
|---|--|
| $e_{c_p} = 0,25 \cdot C_{r,PCM} \cdot Bi_{PCM} - 0,25 \cdot \frac{C_{r,ref}^2}{C_{r,PCM}} \cdot Bi_{ref}$ | |
| $e_{h_{m,cn}} = 0,5 \cdot Bi_{PCM} - 0,25 \cdot C_{r,ref}^2 \cdot Bi_{ref}$ | $-0,22 \cdot Bi_{PCM} \leq \frac{(T_\infty - T_m) \cdot \delta T_{m,cn}}{ T_\infty - T_m ^2} \leq 0$ |
| $e_{h_{m,sur}} = -0,25 \cdot C_{r,ref}^2 \cdot Bi_{ref} - 0,6 \cdot \frac{R_t}{R_{r-c}}$ | $0,22 \cdot Bi_{PCM} \leq \frac{(T_\infty - T_m) \cdot \delta T_{m,sur}}{ T_\infty - T_m ^2} \leq 0,35 \cdot Bi_{PCM}$ |

Siendo el número de Biot empleado en estas expresiones $Bi = h \cdot R / \lambda$.

Estas conclusiones serán empleadas en el diseño planteado de este TFG.

1. 3. Conclusiones

Los materiales de cambio de fase se presentan como una alternativa importante en la mejora de la eficiencia energética de edificios.

Como se ha explicado anteriormente, en los últimos años se han estudiado diversas maneras de introducirlos en los materiales de construcción. Para poder prever el comportamiento de edificios con estos materiales y cuantificar las mejoras obtenidas respecto a edificios convencionales es necesario determinar las propiedades

termofísicas del material de cambio de fase y del material compuesto formado por éste y materiales de construcción tradicionales.

De este hecho surge la necesidad de emplear un nuevo método para la determinación de éstas propiedades. Esta necesidad fue satisfecha por Yinping et al. [29] con el método T-History, posteriormente mejorado por Marín et al. [31, 32].

Aplicando el método mencionado, se puede realizar la caracterización de los materiales de cambio de fase de una manera relativamente sencilla en comparación con los métodos ya existentes hasta el momento. Además, este método utiliza muestras de un tamaño bastante grande, por lo que podría ser empleado para la determinación de propiedades de elementos compuestos por materiales de construcción convencionales y materiales de cambio de fase.

Sin embargo, no existe una instalación disponible comercialmente para este método, lo que implica que pese a que puede ser elaborada con materiales convencionales de laboratorio debe ser verificado su correcto funcionamiento. Para ello, Lázaro et al. [33] propuso un procedimiento de verificación de la instalación.

Finalmente, al ser un método experimental se introducen diversas fuentes de incertidumbre. Por tanto, será necesario controlar la incertidumbre asociada a las sondas de temperatura y el error cometido por la posible aparición de gradientes de temperatura en las muestras. Todo esto va a ser considerado en el diseño realizado en el presente TFG.

REFERENCIAS

- [1] European Union, Directive 2012/27/EU of the European parliament and of the council of 25 October 2012 on the energy efficiency, Official Journal of the European Union, L 315 55 (2012) 1–57.
- [2] Fernández Lladó J., Lacasta Palacio A.M., Haurie Ibarra L. TFM: Análisis del comportamiento al fuego de materiales de construcción con adición de PCM. Universidad Politécnica de Barcelona 2012.
- [3] Kalnaes S.E., Jelle B.P. Phase change materials and products for building applications: A state-of-the-art review and future research opportunities. *Energy and Buildings* 94 (2015) 150–176.
- [4] A. Abhat, Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials, *Solar Energy* 30 (1983) 313–332.
- [5] M.K. Rathod, J. Banerjee, Thermal stability of phase change materials used in latent heat energy storage systems: a review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 18(2013) 246–258.
- [7] Mazo J. Investigación sobre la aplicación del almacenamiento de energía térmica mediante cambio de fase en elementos de construcción termoactivos, Tesis doctoral depositada en la Universidad de Zaragoza, noviembre 2015.
- [8] Mazo, J., Delgado, M., Lázaro, A., Dolado, P., Peñalosa, C., Marin, M. J., Zalba, B. A theoretical study on the accuracy of the T-history method for enthalpy-temperature curve measurement: analysis of the influence of thermal gradients inside T-history samples. *Measurement Science and Technology*. 2015.
- [14] J.H. Dieckmann, Latent heat storage in concrete, Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern, Germany, http://www.eurosolar.org/new/pdfs_neu/Thermal/IRES2006_Dieckmann.pdf (revisado 12/11/2015)
- [15] Zalba B, Marín J. M., Cabeza L. F., Mehling. REVIEW ON THERMAL ENERGY STORAGE WITH PCM, HEAT TRANSFER AND APPLICATIONS. 2003. *Applied Thermal Engineering* 23: 251-283.
- [17] Y. Özonur, M. Mazman, H.Ö. Paksoy, H. Evliya, Microencapsulation of cocofatty acid mixtures for thermal energy storage with phase change material, *Int. J. Energy Res.* 30 (2006) 741–749.
- [18] M.N.A. Hawlader, M.S. Uddin, M.M. Khin, Microencapsulated PCM thermal-energy storage system, *Appl. Energy* 74 (2003) 195–202.
- [19] L.F. Cabeza, A. Castell, C. Barreneche, A. de Gracia, A.I. Fernández, Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: a review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15 (2011) 1675–1695.
- [20] RGEES, Phase change material PIPE, 2014, <http://rgees.com/productspcm-pipe.php>

- [21] RGEES, Phase change material ball, 2014, <http://rgees.com/productspcm-ball.php>
- [22] Salca, What's K-Block, <http://www.salcabv.nl/index.asp?CategorieID=5&Taal=EN>
- [23] T.C. Ling, C.S. Poon, Use of phase change materials for thermal energy storage in concrete: an overview, *Construct. Build. Mater.* 46 (2013) 55–62.
- [24] L.F. Cabeza, C. Castellón, M. Nogués, M. Medrano, R. Leppers, O. Zubillaga, Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings, *Energy and Buildings* 39 (2) (2007) 113–119.
- [25] N. Soares, J.J. Costa, A.R. Gaspar, P. Santos. Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings energy efficiency. *Energy and Buildings* 59 (2013) 82–103.
- [27] Höhne GWH, Hemminger WF, Flammersheim H-J. *Differential scanning calorimetry*. 2nd ed. Berlin: Springer; 2003.
- [28] Chen Zeshan, Ge Xinsti and Gu Yuqing 1991 *Measurement of Thermophysical Properties* (Hefei: USTC) pp 36–81
- [29] Yinping Z, Yi J, Yi J. A simple method, the T-history method, of determining the heat of fusion, specific heat and thermal conductivity of phase-change materials. *Measurement Science and Technology* 1999;10:201–5.
- [30] Solé A, Miró L, Barreneche C, Martorell I, Cabeza LF. Review of the T-history method to determine thermophysical properties of phase change materials (PCM). *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 26 (2013) 425–436.
- [31] Marín JM, Zalba B, Cabeza L F and Mehling H, 2003. Determination of enthalpy-temperature curves of phase change materials with the T-history method—improvement to temperature dependent properties *Meas. Sci. Technol.* 14 184–9.
- [32] Marín JM, Lázaro A, Zalba B. New installation at the university of Zaragoza (Spain) of T-History method to measure the thermal properties. In: *Proceedings of the 8th workshop annex 17, ECES, IEA; 2005.*
- [33] Lázaro A, Günther E, Mehling H, Hiebler S, Marín JM, Zalba B. Verification of a T-history installation to measure enthalpy versus temperature curves of phase change materials. *Measurement Science and Technology* 2006;17:2168–74.

Anexo-II: Análisis de los procesos de transferencia de calor

En este anexo se describe el modelo empleado para analizar los procesos de transferencia de calor en las muestras. Primeramente, se describe el fundamento teórico empleado para el cálculo de los procesos de transferencia de calor en las muestras. En la segunda parte, se muestra el cálculo realizado con EES y el análisis de los resultados obtenidos.

II.1. Fundamento teórico

Como se ha mencionado, si se cumple que el número de Biot ($Bi = hR/\lambda$ ³) es menor o igual que 0,1, las probetas pueden considerarse sistema de capacidad.

De la expresión del número de Biot es objeto de estudio la variable R, radio de la muestra, siendo conocidos los valores de la conductividad térmica, λ (tabla 3.1.) y pudiendo calcular teóricamente h, coeficiente de transferencia de calor de la probeta con el entorno. Esta última variable, si se utilizan estimaciones teóricas, es posible expresarla en función del radio de la probeta (R), con lo que se podría obtener un rango de resultados para el dimensionado de las probetas.

Tabla 3.1.

Propiedades termofísicas del mortero con PCM [34]

| PCM (GR27) | λ [W/(m·K)] | ρ [kg/m ³] | c_p [J/(kg·K)] |
|------------|---------------------|-----------------------------|------------------|
| 25% | 0,8 | 1560 | 1080 |
| 10% | 1,3 | 1805 | 1020 |
| 0% | 1,3 | 1950 | 980 |

En la [figura II.1.](#) se muestra un modelo de montaje del método T-History, en el cual las probetas que se encuentran dentro de una cámara aislada se someten a un incremento/decremento de temperatura. Por tanto, las probetas, en contacto con el aire de dentro de la cámara, experimentan procesos de transferencia de calor ya sea por conducción, convección natural o radiación.

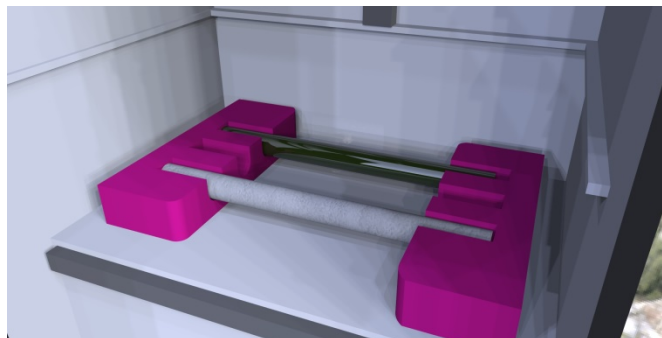


Figura II.1.

Modelo de montaje método T-History

³ En este caso, se ha empleado esta formulación del número de Biot debido a que es más restrictiva.

A continuación, se analizan tres casos con diversas configuraciones para las probetas en las que se modifican los procesos de transferencia de calor que tienen lugar.

Caso 1

Las probetas sin ningún tipo de recubrimiento se encuentran en contacto directo con el aire de la cámara. Por tanto, idealmente, existirá un circuito térmico de resistencia a la transferencia de calor compuesto por una resistencia debida a convección natural y una resistencia debida a la radiación en paralelo. En la [figura II.2.](#) se muestra el esquema de transferencia de calor ideal en las probetas.

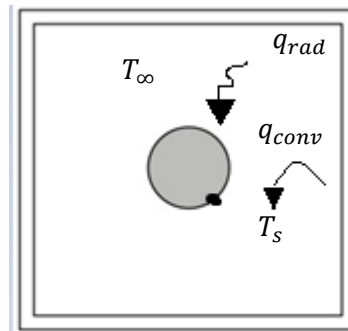


Figura II.2.

Esquema de transferencia de calor ideal en las probetas

Así, el coeficiente de transferencia de calor global estará determinado por el coeficiente de transferencia de calor debido a convección natural más el coeficiente de transferencia de calor debido a radiación ([ec.1](#)).

$$h_{total} = h_{conv} + h_{rad} \quad [ec.1]$$

Para determinar el coeficiente de transferencia de calor debido a convección natural se empleará la [ecuación 2](#), donde el número de Nusselt viene determinado por la relación de Churchill-Chu [], [ecuación 3](#).

$$Nus_D = \frac{h_{conv} \cdot D}{\lambda} \quad [ec.2]$$

$$Nus_D = \left[0.6 + \frac{0.387 \cdot Ra_D^{1/6}}{\left(1 + \left[\frac{0.559}{Pr} \right]^{9/16} \right)^{8/27}} \right]^2 \quad [ec.3]$$

Siendo Ra_D y Pr el número de Rayleigh y el número de Prandtl respectivamente. En la [ecuación 4](#) y la [ecuación 5](#) se muestran las ecuaciones de dichos números.

$$Ra_D = \frac{g \cdot \beta \cdot [T_s - T_a] \cdot D^3}{\nu \cdot \alpha} \quad [ec.4]$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad [ec. 5]$$

Por otra parte, el coeficiente de transferencia de calor debido a radiación se calculará a partir de la ley de Stefan-Boltzmann, [ecuación 6](#). La cual permite calcular la radiación emitida por una superficie real en todas las direcciones.

$$h_{rad} = \frac{q_{rad}}{\Delta T} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_s^2 + T_a^2) \cdot (T_s + T_a) \quad [\text{ec.6}]$$

Siendo ε la emisividad del material, con un valor habitual de 0,9 para superficies no metálicas ni brillantes.

Caso 2

Si el coeficiente de transferencia de calor global resultase demasiado elevado en el caso anterior, lo cual conllevaría a diámetros de probetas demasiado reducidos, existiría la posibilidad de disminuir la contribución realizada por el término debido a radiación.

El modelo de transferencia de calor sería equivalente al descrito en el caso 1. La única diferencia sería el valor de la emisividad del material, empleando un recubrimiento metálico brillante se podría suponer $\varepsilon = 0,05$.

Caso 3

Por otra parte, existe la posibilidad de emplear un material aislante recubriendo la probeta como podría ser poliestireno extruido.

En este caso, el modelo de transferencia de calor se vería modificado ya que también intervendría el proceso de conducción, además de la convección natural y la radiación. El circuito térmico se vería modificado, teniendo la resistencia debida a conducción de la probeta con el aislante en serie con las resistencias debidas a la radiación y la convección natural del aislante con el aire que se encuentran en paralelo. Por lo que la resistencia equivalente sería menor disminuyendo el coeficiente global de transferencia de calor. En la [figura II.3](#). se muestra el modelo ideal de transferencia de calor para probetas con aislante.

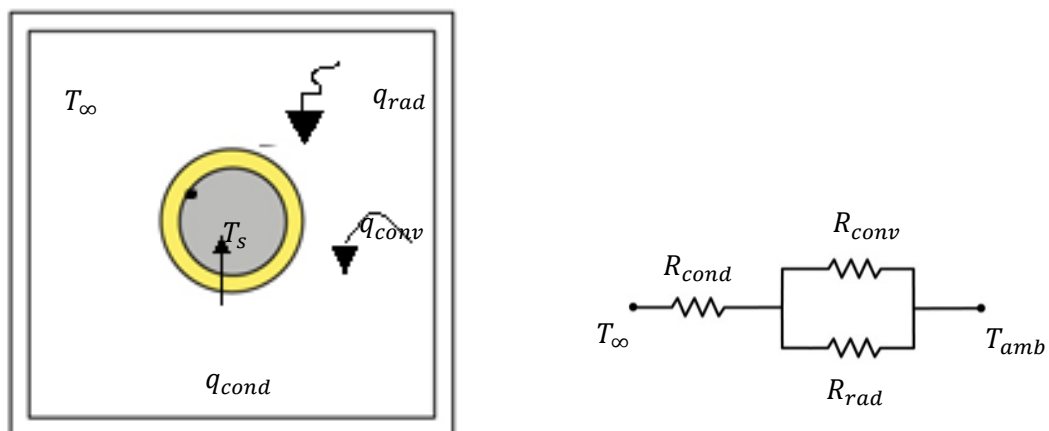


Figura II.3.

Modelo ideal de transferencia de calor para probetas con aislante

Con respecto al modelo matemático, el coeficiente global de transferencia de calor se calcularía conforme a la [ecuación 7](#).

$$U_{eq} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_{int} \cdot (R_{cond} + R_{conv-rad})} \quad [ec.7]$$

Donde R_{cond} se calcula según la [ecuación 8](#) y $R_{conv-rad}$ según la [ecuación 9](#).

$$R_{cond} = \frac{\ln(r_{ext}/r_{int})}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{ais}} \quad [ec.8]$$

$$R_{conv-rad} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_{ext} \cdot h_{total}} \quad [ec.9]$$

Siendo h_{total} el coeficiente de transferencia de calor debido a convección natural y radiación, calculado según el procedimiento descrito en el caso 1.

II.2. Cálculo con EES y Análisis de Resultados

Los modelos matemáticos de transferencia de calor descritos en el apartado anterior, se han calculado empleando el programa Engineering Equation Solver, EES. A continuación, se muestra el programa empleado para cada uno de los casos, así como los resultados obtenidos.

Caso 1

{Cálculo dimensiones probeta}

{Variables}

T_a= 273 [K]

T_s= 273 {Valor a evaluar entre 0 °C y 40°C}

P=101325 [Pa]

{Datos}

k_probeta=0.8 [W/m*K] {Conductividad más restrictiva de las probetas para probetas de 25 % PCM }

beta=VolExpCoef(Air_ha,T=T_a,P=P)

mu=Viscosity(Air,T=T_a)

rho=Density(Air,T=T_a,P=P)

k=Conductivity(Air,T=T_a)

cp=Cp(Air,T=T_a)

epsilon=0.9 {emisividad superficie}

{Convección natural}

Nus_D=(h_conv*D)/k

Nus_D=(0.6+((0.387*Ra_D^(1/6))/(1+(0.559/Pr)^(9/16)))^(8/27))^2

Pr=Prandtl(Air,T=T_a)

nu=mu/rho

alpha=k/(cp*rho)

Ra_D=(g#*beta*(abs(T_s-T_a))*D^3)/(nu*alpha)

{Radiación}

h_rad=epsilon*sigma#*(T_a^2+T_s^2)*(T_a+T_s)

{Total}

$$h_{total}=h_{conv}+h_{rad}$$

$$((h_{total}*(D/2))/k_{probeta})=Bi$$

$$Bi=0.1$$

En la [figura II.4.](#) se muestra el resultado obtenido para un rango de simulación de temperaturas entre 0 °C y 40 °C.

| 1.20 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--------|-----------------------|--|---|---|----------|
| | T _s [K] | h _{conv} [W/m ² *K] | h _{rad} [W/m ² *K] | h _{total} [W/m ² *K] | D [m] |
| Run 1 | 313 | 5.706 | 0.3009 | 6.007 | 0.05327 |
| Run 2 | 311.4 | 5.604 | 0.2984 | 5.903 | 0.05421 |
| Run 3 | 309.8 | 5.499 | 0.296 | 5.795 | 0.05522 |
| Run 4 | 308.3 | 5.39 | 0.2936 | 5.683 | 0.0563 |
| Run 5 | 306.7 | 5.276 | 0.2911 | 5.567 | 0.05748 |
| Run 6 | 305.1 | 5.157 | 0.2888 | 5.446 | 0.05876 |
| Run 7 | 303.5 | 5.032 | 0.2864 | 5.318 | 0.06017 |
| Run 8 | 301.9 | 4.9 | 0.284 | 5.184 | 0.06172 |
| Run 9 | 300.4 | 4.761 | 0.2817 | 5.043 | 0.06345 |
| Run 10 | 298.8 | 4.614 | 0.2794 | 4.893 | 0.0654 |
| Run 11 | 297.2 | 4.456 | 0.2771 | 4.733 | 0.06761 |
| Run 12 | 295.6 | 4.286 | 0.2748 | 4.561 | 0.07016 |
| Run 13 | 294.1 | 4.101 | 0.2725 | 4.374 | 0.07316 |
| Run 14 | 292.5 | 3.898 | 0.2702 | 4.168 | 0.07677 |
| Run 15 | 290.9 | 3.671 | 0.268 | 3.939 | 0.08124 |
| Run 16 | 289.3 | 3.411 | 0.2658 | 3.677 | 0.08704 |
| Run 17 | 287.7 | 3.103 | 0.2636 | 3.367 | 0.09505 |
| Run 18 | 286.2 | 2.717 | 0.2614 | 2.978 | 0.1075 |
| Run 19 | 284.6 | 2.166 | 0.2592 | 2.425 | 0.132 |
| Run 20 | 283 | 0.007666 | 0.257 | 0.2647 | 1.209 |

Figura II.4.

Simulación diámetro muestras en función de T_s con Bi=0.1 y T_a=273 K

En la [figura II.5.](#) se muestra la variación del diámetro (D) en función de la temperatura en la superficie de la probeta (T_s) para distintos números de Biot⁴ impuestos.

⁴ Siendo la ecuación del número de Biot empleada $Bi=h \cdot R/\lambda$

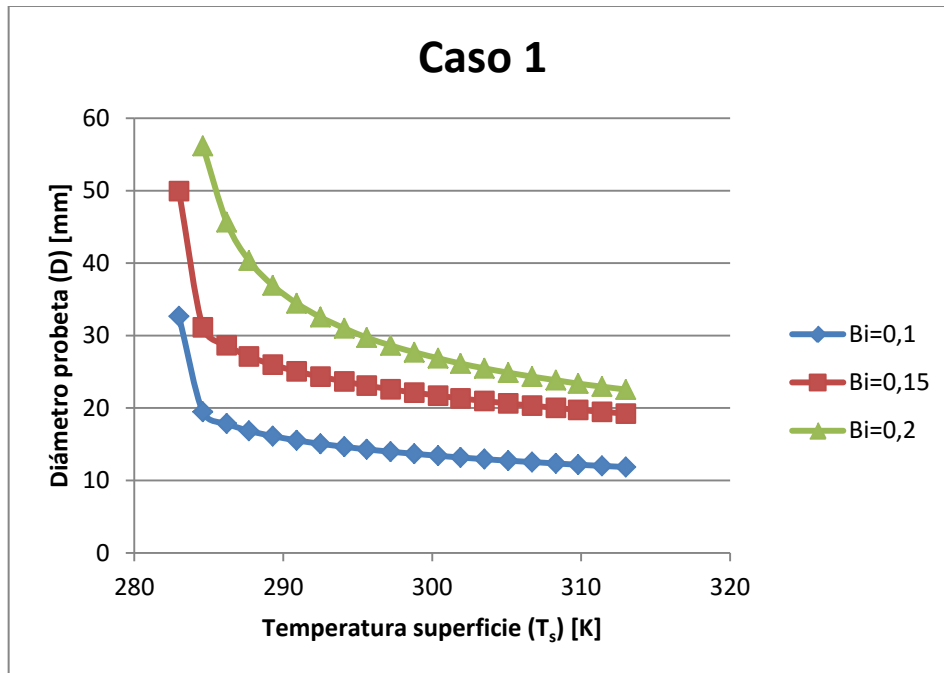


Figura II.5.

Diámetro en función de la temperatura de la muestra, Caso 1

Como se puede apreciar en la figura anterior, para una temperatura determinada, el diámetro que cumple la condición del número de Biot impuesta, aumenta conforme se incrementa el valor de dicho número. Centrando la atención sobre la restricción $Bi=0,1$, todos los valores obtenidos entre la franja de 10 mm y, aproximadamente, 18 mm de diámetro cumplen la condición de $Bi=0,15$ para cualquier valor de temperatura T_s . Los diámetros entre aproximadamente 18 mm y 20 mm cumplen la condición de $Bi=0,2$ para cualquier valor de temperatura T_s . El único valor que no cumpliría $Bi=0,15$ ni $Bi=0,2$ para cualquier valor de temperatura T_s es el valor de 32 mm.

Por tanto, puede estimarse un rango de valores para el diámetro entre aproximadamente 12 mm y 20 mm que cumplen $0,1 \leq Bi \leq 0,2$. A partir de este rango de valores, se realizará el dimensionado final en el siguiente capítulo.

Caso 2

{Cálculo dimensiones probeta disminuyendo el efecto radiante}

{Variables}

$T_p = 273$ [K]

$T_a = T_p$

$T_s = 273$ {Valor a evaluar entre 0 °C y 40°C}

$P = 101325$ [Pa]

{Datos}

$k_{\text{probeta}} = 0.8$ [W/m*K] {Conductividad más restrictiva de las probetas; para probetas de 25 % PCM }

$\beta = \text{VolExpCoef}(\text{Air}_{ha}, T=T_a, P=P)$

$\mu = \text{Viscosity}(\text{Air}, T=T_a)$

rho=Density(Air,T=T_a,P=P)
k=Conductivity(Air,T=T_a)
cp=Cp(Air,T=T_a)
epsilon=0.05 {emisividad aproximada de superficie para papel de aluminio}

{Convección natural}

Nus_D=(h_conv*D)/k
 $Nus_D = (0.6 + ((0.387 * Ra_D^{1/6}) / (1 + (0.559 / Pr)^{9/16})^{8/27}))^2$
Pr=Prandtl(Air,T=T_a)
nu=mu/rho
alpha=k/(cp*rho)
 $Ra_D = (g * \beta * (\text{abs}(T_s - T_a)) * D^3) / (\nu * \alpha)$

{Radiación}

$h_{rad} = \epsilon * \sigma * (T_p^2 + T_s^2) * (T_p + T_s)$ {Suponiendo $T_{pared} = T_{aire}$, cte}

{Total}

$h_{total} = h_{conv} + h_{rad}$
 $((h_{total} * (D/2)) / k_{vidrio}) = Bi$
Bi=0.1

En la [figura II.6](#). se muestra el resultado obtenido para un rango de simulación de temperaturas entre 0 °C y 40 °C.

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--------|-----------------------|--|---|---|----------|
| | T _s [K] | h _{conv} [W/m ² *K] | h _{rad} [W/m ² *K] | h _{total} [W/m ² *K] | D [m] |
| Run 1 | 313 | 6.795 | 0.3009 | 7.095 | 0.02255 |
| Run 2 | 311.4 | 6.674 | 0.2984 | 6.972 | 0.02295 |
| Run 3 | 309.8 | 6.549 | 0.296 | 6.845 | 0.02337 |
| Run 4 | 308.3 | 6.419 | 0.2936 | 6.713 | 0.02384 |
| Run 5 | 306.7 | 6.284 | 0.2911 | 6.575 | 0.02434 |
| Run 6 | 305.1 | 6.142 | 0.2888 | 6.431 | 0.02488 |
| Run 7 | 303.5 | 5.994 | 0.2864 | 6.28 | 0.02548 |
| Run 8 | 301.9 | 5.837 | 0.284 | 6.121 | 0.02614 |
| Run 9 | 300.4 | 5.672 | 0.2817 | 5.954 | 0.02687 |
| Run 10 | 298.8 | 5.497 | 0.2794 | 5.776 | 0.0277 |
| Run 11 | 297.2 | 5.309 | 0.2771 | 5.586 | 0.02864 |
| Run 12 | 295.6 | 5.107 | 0.2748 | 5.382 | 0.02973 |
| Run 13 | 294.1 | 4.888 | 0.2725 | 5.16 | 0.03101 |
| Run 14 | 292.5 | 4.646 | 0.2702 | 4.917 | 0.03254 |
| Run 15 | 290.9 | 4.376 | 0.268 | 4.644 | 0.03445 |
| Run 16 | 289.3 | 4.068 | 0.2658 | 4.333 | 0.03692 |
| Run 17 | 287.7 | 3.702 | 0.2636 | 3.966 | 0.04035 |
| Run 18 | 286.2 | 3.243 | 0.2614 | 3.505 | 0.04565 |
| Run 19 | 284.6 | 2.589 | 0.2592 | 2.848 | 0.05617 |
| Run 20 | 283 | 0.01553 | 0.257 | 0.2726 | 0.587 |

Figura II.6.

Simulación diámetro muestras en función de Ts con Bi=0.1 y Ta=273 K

En la [figura II.7](#). se ha realizado una representación de la variación del diámetro de las muestras en función de la temperatura en la superficie de la probeta (T_s).

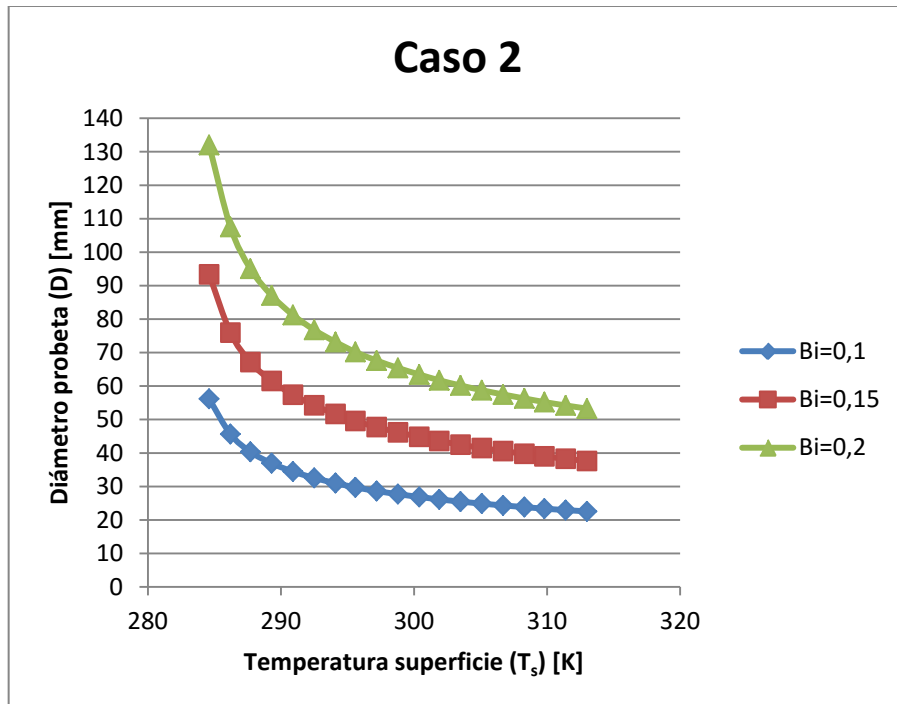


Figura II.7.

Diámetro en función de la temperatura de la muestra, Caso 2

En este caso, se puede apreciar que el rango de diámetros de Bi=0,1 entre aproximadamente 35 mm y 20 mm cumplirían Bi=0,15 para cualquiera de las temperaturas superficiales de la probeta. Por otra parte, el rango de diámetros superior a 35 mm y hasta aproximadamente 55 mm cumpliría Bi= 0,2.

Por tanto, sería aconsejable emplear un diámetro de probeta entre 20 mm y 35 mm. La elección final de este diámetro se realiza en el siguiente capítulo.

Caso 3

{Cálculo dimensiones probetas con aislante}

{Variables}

T_p= 273 [K]

T_a=T_p

T_s= 318 {Valor a evaluar entre 0 °C y 40°C}

P=101325 [Pa]

{Datos}

k_{pcm}=0.8 [W/m*K]

k_{aislante}=0.035 [W/m*K] {Poliestireno extruido}

k=Conductivity(Air,T=T_a)

beta=VolExpCoef(Air_ha,T=T_a,P=P)

mu=Viscosity(Air,T=T_a)

rho=Density(Air,T=T_a,P=P)

rho_aislante= 35 [kg/m³]

rho_muestra= 1560 [kg/m³]

cp=Cp(Air,T=T_a)

cp_aislante= 1450 [J/kg·K]

$cp_muestra = 1080 \text{ [J/kg}\cdot\text{K]}$
 $\epsilon = 0.9$ {emisividad superficie}
 $rel_radios = r_ext/r_int$

{Conducción}

$$R_cond = \ln(rel_radios) / (2 \cdot \pi \cdot k_aislante)$$

{Convección natural}

$$Nus_D = (h_conv \cdot 2 \cdot r_ext) / k$$

$$Nus_D = (0.6 + ((0.387 \cdot Ra_D^{1/6}) / (1 + (0.559 / Pr)^{9/16})^{8/27}))^2$$

$$Pr = Prandtl(Air, T = T_a)$$

$$\nu = \mu / \rho$$

$$\alpha = k / (cp \cdot \rho)$$

$$Ra_D = (abs(g \cdot \beta \cdot abs(T_s - T_a) \cdot (2 \cdot r_ext)^3)) / (\nu \cdot \alpha)$$

{Radiación}

$$h_rad = \epsilon \cdot \sigma \cdot (T_p^2 + T_s^2) \cdot (T_p + T_s)$$
 {Suponiendo $T_pared = T_aire$, cte}

{Total Convección-Radiación}

$$h_convrad = h_conv + h_rad$$

$$R_convrad = (1 / (2 \cdot \pi \cdot r_ext \cdot h_convrad))$$

{Total}

$$U_eq = 1 / ((2 \cdot \pi \cdot r_int) \cdot (R_cond + R_convrad))$$

$$((U_eq \cdot r_int) / k_pcm) = Bi$$

$$r_int = 0.02$$

$$Bi = 0.1$$

$$r_ext = r_int + e_aislante$$

Para la simulación realizada en este caso, se han empleado los rangos de diámetros determinados anteriormente con la finalidad de conocer el espesor de aislante que sería necesario emplear. Las condiciones de simulación han sido $T_s = 313 \text{ K}$, $T_\infty = 283 \text{ K}$ y $Bi = 0,1$ para una probeta de mortero con 25 % de PCM.

En la [figura II.8.](#) se muestran los resultados obtenidos con EES. Como puede apreciarse se obtendría un espesor óptimo para trabajar para probetas con diámetros entre 28 mm y 32 mm.

| 1..10 | 1 r_int [m] | 2 r_ext [m] | 3 rel_radios | 4 $e_aislante$ [m] |
|--------|----------------------|----------------------|-----------------|---------------------------|
| Run 1 | 0.006 | 0.006255 | 1.042 | 0.0002546 |
| Run 2 | 0.007111 | 0.007972 | 1.121 | 0.0008606 |
| Run 3 | 0.008222 | 0.009684 | 1.178 | 0.001462 |
| Run 4 | 0.009333 | 0.01139 | 1.221 | 0.002061 |
| Run 5 | 0.01044 | 0.0131 | 1.255 | 0.00266 |
| Run 6 | 0.01156 | 0.01482 | 1.282 | 0.00326 |
| Run 7 | 0.01267 | 0.01653 | 1.305 | 0.00386 |
| Run 8 | 0.01378 | 0.01824 | 1.324 | 0.00446 |
| Run 9 | 0.01489 | 0.01995 | 1.34 | 0.005061 |
| Run 10 | 0.016 | 0.02166 | 1.354 | 0.005662 |

Figura II.8.

Simulación para determinar espesor de aislante

Referencias

- [1] Yinping Z, Yi J, Yi J. A simple method, the T-history method, of determining the heat of fusion, specific heat and thermal conductivity of phase-change materials. *Measurement Science and Technology* 1999;10:201–5.
- [2] Incropera F.P., Dewitt D.P., Bergman T.L., Lavine A.S. “Fundamentals of Heat and Mass Transfer”. John Wiley & Sons, Inc. 6th edition, 2007.
- [3] Haurie L., Mazo J., Zalba B., Delgado M. Fire behaviour of a mortar with different mass fractions of phase change material for use in radiant floor systems. *Energy and Buildings* 84, 86–93. 2014.
- [4] Lázaro Fernández, A. Tesis doctoral: “Almacenamiento térmico de energía mediante cambio de fase. Aplicaciones en edificios: Caracterización del comportamiento de los materiales e instalación de ensayos para prototipos de intercambio de calor con aire”. Universidad de Zaragoza. Noviembre 2008.

Anexo-III: Diseño de los moldes y dimensionado de las probetas de muestra

Este anexo contiene el procedimiento seguido para la determinación final de las dimensiones de las muestras. En la primera parte, se realiza una valoración sobre los posibles moldes que se podrían emplear para la fabricación de las probetas con la finalidad de elegir uno de ellos. En la segunda parte, a partir del molde elegido, las conclusiones del análisis de los procesos de transferencia de calor realizado anteriormente y otras consideraciones que serán detalladas en el presente anexo, se realiza el dimensionado final de las muestras.

III.1. Elección de los moldes utilizados para la fabricación de probetas de muestra

III.1.1. Presentación de alternativas

En general, se pueden presentar dos alternativas en la elección de un tipo de molde, moldes reutilizables o moldes desechables. La única diferencia entre los dos tipos de moldes es el número de usos, ya que la forma, en este caso cilíndrica, debe mantenerse independientemente del tipo de molde.

Las características que debe proporcionar el molde a la probeta son:

- ✓ Forma cilíndrica
- ✓ Poca o nula rugosidad en las paredes de las probetas

Estas características implican, además de la forma tubular del molde, que la cara interior de los moldes sea lisa.

Si el molde es desechable, además de cumplir las condiciones anteriores, debe ser de un material que se pueda destruir fácilmente sin dañar las probetas. Las alternativas propuestas para este tipo de moldes fueron las siguientes:

- 1ª. Tubos de PVC
- 2ª. Tubos de silicona
- 3ª. Molde con forma cilíndrica de poliestireno expandido [\[1\]](#)

En la [figura III.1.](#) se muestran unos ejemplos de las alternativas para moldes desechables.



a.)

b.)

c.)

Figura III.1.

a.) Tubo de PVC [2] b.) Tubo de silicona [3] c.) Molde de poliestireno expandido con forma rectangular [1]

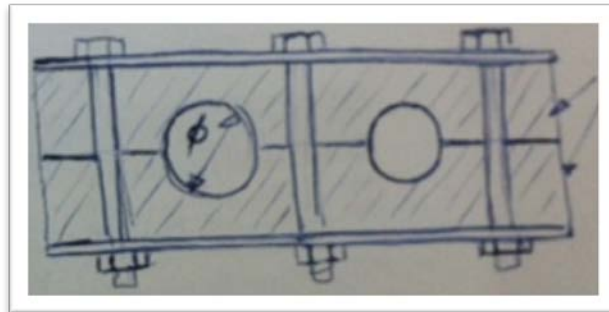
El uso de este tipo de moldes consistiría en realizar el llenado del molde con la pasta de mortero y PCM. Posteriormente y cuando la pasta haya solidificado pero no secado, se procedería a la destrucción del molde.

Por otra parte, si el molde fuese reutilizable las alternativas serían:

1ª. Tubos de PVC [1]

2ª. Molde con forma cilíndrica de poliestireno extruido

En la [figura III.2.](#) se muestran unos ejemplos de moldes reutilizables.



a.)

b.)

Figura III.2.

a.) Molde de tubos de PVC [1] b.) Esquema de molde de poliestireno extruido

En este caso, el procedimiento de uso consistiría en verter la pasta en el molde cerrado. Después de la solidificación inicial del material, se procedería a la apertura del molde por las zonas de unión, desmoldando la pieza deseada. Finalmente, se procedería a la limpieza de los moldes para que pudieran ser reutilizados.

III.1.2. *Discusión y elección del tipo de molde*

Para la elección del tipo de molde, se ha elaborado una tabla ([tabla III.1.](#)) donde se exponen las ventajas e inconvenientes para cada tipo de molde.

Tabla III.1.

Ventajas e inconvenientes de los distintos tipos de moldes

| Tipo de molde | Ventajas | Inconvenientes |
|-------------------------------|---|--|
| Tubo de PVC desechable | - No existen zonas de unión donde se puedan originar rebabas u otros defectos | - Posible dañado y ruptura de la probeta solidificada cuando se corte el molde. - Para la fabricación de un elevado número de probetas, sería necesaria |

| | | |
|---|--|--|
| | | la preparación de un elevado número de moldes, lo que implica mayor coste. |
| Tubo de silicona desechable | <ul style="list-style-type: none"> - No existen zonas de unión donde se puedan originar rebabas u otros defectos - Los tubos de silicona poseen mayor flexibilidad que los de PVC, por lo que es más fácil cortarlos | <ul style="list-style-type: none"> - Baja rigidez del material, por lo que puede resultar necesario un soporte para obtener la forma deseada - Si se desea la fabricación de un elevado número de probetas, sería necesaria la preparación de un elevado número de moldes |
| Poliestireno expandido desechable | <ul style="list-style-type: none"> - No existen zonas de unión donde se puedan originar rebabas u otros defectos | <ul style="list-style-type: none"> - Posible dañado de las probetas en la destrucción del molde. - Si se desea la fabricación de un elevado número de probetas, sería necesaria la preparación de un elevado número de moldes - Mayor rugosidad que tubos de PVC y silicona - Peligro de deformación del poliestireno expandido si se alzasen temperaturas superiores a 80 °C durante el fraguado. |
| Tubos de PVC reutilizables | <ul style="list-style-type: none"> - Con unos pocos moldes se pueden fabricar cantidades elevadas de probetas - Montaje sencillo con elementos de fácil adquisición y pequeño coste | <ul style="list-style-type: none"> - Peligro de que las dos partes del molde no se ajusten bien y se originen imperfecciones como rebabas o deformación de la probeta - Peligro de que durante la fase inicial de moldeado los elementos de sujeción se aflojen creando rebabas y distorsión de las dimensiones |
| Poliestireno extruido reutilizable | <ul style="list-style-type: none"> - Con unos pocos moldes se pueden fabricar cantidades elevadas de probetas | <ul style="list-style-type: none"> - Posible formación de rebabas debido a la unión del molde - Peligro de deformación del poliestireno extruido si se alzasen temperaturas superiores a 80 °C durante el fraguado |

Analizando en detalle la [tabla III.1.](#), se puede concluir que el principal inconveniente de los moldes desechables es la posible rotura de las probetas en el desmoldado. En el caso de los tubos de PVC y silicona, la pared del tubo puede ser demasiado estrecha para cortarla con precisión, mientras que el molde de poliestireno expandido, aunque existen referencias bibliográficas que lo han empleado [1], puede resultar complicado eliminar todo el material, ya que para conseguir la forma cilíndrica deseada este caso, no existiría ninguna superficie de la probeta libre, lo que implica además, el peligro de no disipar correctamente el calor originado durante el fraguado.

Por otra parte, los moldes reutilizables proporcionan la ventaja de un desmoldado más sencillo y en principio, con una menor aplicación de fuerzas. Sin embargo, pueden ocasionarse defectos si las partes del molde no se unen con precisión, aunque teniendo en cuenta anteriores trabajos utilizando tubos de PVC [1], no se ha documentado que se hayan producido tales defectos. Respecto al molde de poliestireno extruido, no existe ningún antecedente, por lo que no se puede prever su comportamiento en cuanto a la calidad en la zona de unión del molde y al calor originado durante el fraguado.

Por ello, se ha decidido emplear un molde reutilizable fabricado con tubo de PVC.

III.1.3. Dimensiones disponibles de moldes

Para el diseño de los moldes de tubos de PVC, se ha consultado el catálogo de Leroy Merlin para determinar con que dimensiones de tubos se podría disponer para trabajar. En la [tabla III.2.](#) se muestran la relación de tamaños existentes.

Tabla III.2.

Relación de tamaños disponibles para tubos de PVC [2]

| Diámetro externo (mm) | Diámetro interno (mm) | Longitud (m) | Precio (€) |
|-----------------------|-----------------------|--------------|------------|
| 16 | 12 | 2.4 | 1.19 |
| 20 | 16 | 2.4 | 1.79 |
| 25 | 21 | 2.4 | 2.55 |
| 32 | 28 | 2.4 | 3.55 |

III.2. Dimensionado de las probetas

En esta sección se realiza una comparación entre el rango de dimensiones considerado válido para las probetas y las dimensiones disponibles de los moldes empleados para la fabricación de las probetas.

Una vez realizada esta comparación se aplicarán otras consideraciones como la resistencia teórica de las probetas, el fondo de escala de la báscula, la disponibilidad de PCM...

III.2.1. Restricción de las dimensiones de moldes disponibles sobre las dimensiones válidas teóricamente

Los rangos de diámetros considerados adecuados para las probetas han sido de 12 mm a 20 mm para el caso 1, de 20 a 35 mm para el caso 2 y de 28 mm a 32 mm para el caso 3.

Teniendo en cuenta las dimensiones de tubos de PVC disponibles, los rangos anteriores quedan reducidos a 12 mm o 16 mm para el caso 1, 21 o 28 mm para el caso 2 y 28 mm para el caso 3.

III.2.2. Otras consideraciones

Para realizar la elección final del diámetro de las probetas de muestra se han estudiado otros factores que se exponen a continuación.

Resistencia de las probetas

Se ha realizado un cálculo orientativo⁵ modelando la probeta como viga biapoyada.

Los casos estudiados han sido dos, probeta biapoyada con carga distribuida y probeta biapoyada con carga puntual en el centro. A continuación, se detallan los cálculos realizados en los dos casos.

- Probeta biapoyada con carga distribuida

Este modelo permite obtener un cálculo orientativo de la carga que puede soportar la sección de la probeta. En la [figura III.3.](#) se muestra el modelo empleado.

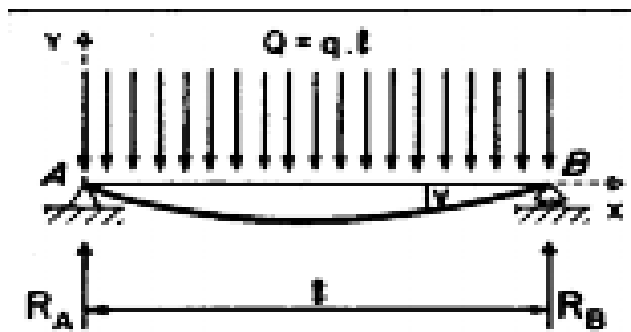


Figura III.3.

Modelo de viga biapoyada con carga distribuida

El modelo matemático utilizado se describe en las siguientes ecuaciones.

$$\sigma_{flex,max} \geq \frac{M_{max}}{I_z} \cdot y_{max} \quad [ec. 10]$$

$$M_{max} = \frac{Q \cdot l}{8} \quad [ec. 11]$$

$$I_z = \frac{\pi r^4}{4} \quad [ec. 12]$$

$$y_{max} = r \quad [ec. 13]$$

Los resultados obtenidos con este modelo para los diámetros de estudio empleando las ecuaciones anteriores se muestran en la [tabla III.3.](#)

⁵ Se considera orientativo ya que los cálculos empleados se corresponden con situaciones ideales en las que solo existe flexión y aunque se ha considerado una resistencia a flexión estimada en otros estudios realizados para PCM, al tratarse de un material compuesto, la carga real capaz de soportar puede ser menor.

Tabla III.3.

Carga máxima a flexión para modelo de carga distribuida

| Diámetro (mm) | Longitud (mm) | Radio (mm) | Inercia en z (mm ⁴) | Resistencia máxima a flexión (N/mm ²) | Y máxima (mm) | Carga máxima (N) | Carga máxima (kg) |
|---------------|---------------|------------|---------------------------------|---|---------------|------------------|-------------------|
| 12 | 120 | 6 | 1017,87 | 1,000 | 6,000 | 11,310 | 1,154 |
| 16 | 160 | 8 | 3216,99 | 1,000 | 8,000 | 20,106 | 2,051 |
| 21 | 210 | 10,5 | 9546,56 | 1,000 | 10,500 | 34,636 | 3,534 |
| 28 | 280 | 14 | 30171,85 | 1,000 | 14,000 | 61,575 | 6,282 |

Como puede observarse las cargas que pueden soportar las probetas no son demasiado elevadas, especialmente la probeta de 12 mm de diámetro con aproximadamente 1 kg.

- Probeta biapoyada con carga puntual en el centro

Este modelo permite obtener un cálculo orientativo de la carga máxima puntual que puede soportar la probeta. En la [figura III.4.](#) se muestra el modelo de viga biapoyada con carga puntual empleado.

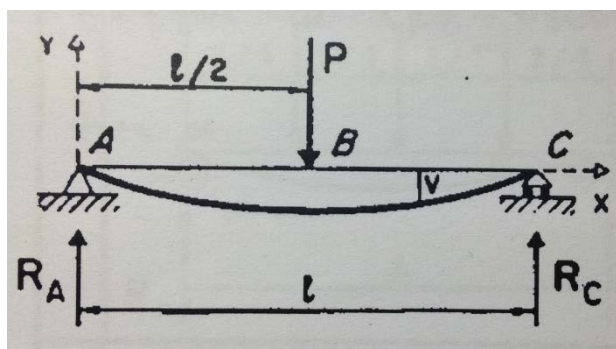


Figura III.4.

Modelo de viga biapoyada con carga puntual

El modelo matemático utilizado se describe en las siguientes ecuaciones.

$$\sigma_{flex,max} \geq \frac{M_{max}}{I_z} \cdot y_{max} \quad [ec. 10]$$

$$M_{max} = \frac{P \cdot l}{4} \quad [ec. 11]$$

$$I_z = \frac{\pi r^4}{4} \quad [ec. 12]$$

$$y_{max} = r \quad [ec. 13]$$

Los resultados obtenidos con este modelo para los diámetros de estudio empleando las ecuaciones anteriores se muestran en la [tabla III.4.](#)

Tabla III.4.

Carga máxima a flexión para modelo de carga puntual

| Diámetro (mm) | Longitud (mm) | Radio (mm) | Inercia en z (mm ⁴) | Resistencia máxima a flexión (N/mm ²) | Y máxima (mm) | Carga máxima (N) | Carga máxima (kg) |
|---------------|---------------|------------|---------------------------------|---|---------------|------------------|-------------------|
| 12 | 120 | 6 | 1017,87 | 1,00 | 6,00 | 5,65 | 0,58 |
| 16 | 160 | 8 | 3216,99 | 1,00 | 8,00 | 10,05 | 1,03 |
| 21 | 210 | 10,5 | 9546,56 | 1,00 | 10,50 | 17,31 | 1,77 |
| 28 | 280 | 14 | 30171,85 | 1,00 | 14,00 | 30,78 | 3,14 |

Como se puede observar, la carga capaz de soportar la probeta de 12 mm es pequeña por lo que sería más aconsejable emplear la probeta de 16 mm de diámetro. Igualmente, la probeta de 28 mm sería una mejor opción por soportar una carga de casi el doble que la probeta de 21 mm.

Fondo de escala de la báscula

Se ha considerado este factor ya que si la masa de las probetas superase el fondo de escala de la báscula disponible en el "Laboratorio de Determinación de Propiedades Termofísicas" de la Universidad de Zaragoza, en este caso 450 g., no se podría realizar el pesado de las mismas.

En la [tabla III.5.](#) se muestran los cálculos para determinar la masa aproximada de las probetas de muestra.

Tabla III.5.

Masa de las probetas de muestra

| Diámetro (m) | Radio (m) | Longitud (m) | Volumen (m ³) | Densidad (kg/m ³) | Masa (g) |
|--------------|-----------|--------------|---------------------------|-------------------------------|----------|
| 0,016 | 0,008 | 0,180 | 3,619E-05 | 1560,000 | 56,458 |
| 0,028 | 0,014 | 0,300 | 1,847E-04 | | 288,172 |

Como puede observarse las probetas no superan el fondo de escala de la báscula.

Anexo-IV: Elección de las Sondas de Temperatura

En este anexo se detalla el procedimiento seguido en la elección de las sondas de temperatura más adecuadas para realizar el montaje necesario del método T-History. En primer lugar, se describe la elección de tipología de sonda en base a las características de la instalación. Posteriormente, se realiza la elección del modelo de sonda más adecuado disponible en el mercado.

IV.1. Elección de la tipología de sonda de temperatura

IV.1.1. Tipos de sondas de temperatura

Como se ha explicado anteriormente, la medida de temperatura es esencial para la aplicación del método T-History [1, 2].

Existen diversos tipos de instrumentos de medida de temperatura entre los que habrá que seleccionar el más adecuado para este caso. En los siguientes párrafos se detallan brevemente las características de estos instrumentos [3].

Los instrumentos de temperatura utilizan diversos fenómenos que son influidos por la temperatura como pueden ser la variación en volumen o el estado de los cuerpos, la variación de la resistencia de un conductor y la f.e.m. creada en la unión de dos metales distintos entre otros. En la [figura IV.1.](#) pueden verse los distintos instrumentos existentes con sus intervalos de medida.

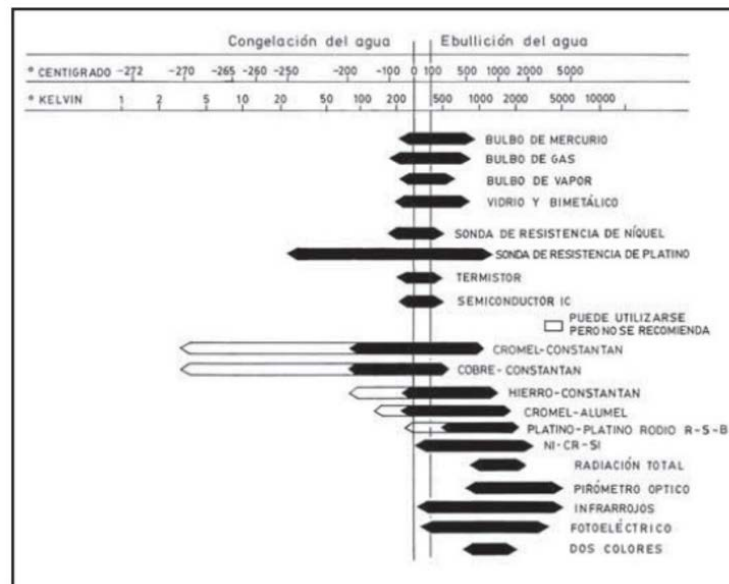


Figura IV.1.

Campo de medida de los instrumentos de temperatura [3]

En la [tabla IV.1.](#) se muestra una comparación de las características de los diversos tipos de instrumentos de medida de temperatura.

Tabla IV.1.

Características de los transductores eléctricos de temperatura [3]

| Tipo de elemento | Deriva | Alcance mínimo | Precisión | Repetibilidad | Temp. Máx. °C | Distancia máxima al receptor | Linealidad | Atmósfera de trabajo |
|---------------------|--|----------------|------------|---------------|---------------|------------------------------|--------------------------|---|
| Térmico | < 1% /año | 28 °C | ±1 % | ±0,25 % | 500 | 6 m | Sí, excepto vapor | Depende del material del bulbo |
| Bimetal | - | 50 °C | ±1 % | ±0,25 % | 500 | - | Buena | Depende del material |
| Resistencia de Ni | 0,3 °C/año | <11 °C | ±0,5°C | 0,05 °C | 300 | < 300 m | Escala exp. a baja temp. | A proteger en líquidos y atm. corrosiva |
| Resistencia de Pt | <0,05 °C/año | < 3°C | ±0,01 °C | 0,03 °C | 950 | < 1500 m | Excelente | A proteger en líquidos y atm. corrosiva |
| Resistencia de Cu | - | - | ±0,1 °C | - | 120 | - | Buena | A proteger en líquidos y atm. corrosiva |
| Termistor | Sin envejecer 1°C/año Envejecido <0,05 °C/año | < 1°C | ±0,005 °C | 0,03-0,11 °C | 400 | < 1500 m | Pobre | Cualquiera |
| Termopar tipo T | < 0,5 °C/año | - | 0,4-0,8 °C | ~ 0,11 °C | 370 | < 1500 m | Buena | Oxidante-reductora |
| Termopar tipo J | | | 1,1-2,2 °C | ~ 0,11 °C | 550 | - | Buena | Reductora |
| Termopar tipo K | | | ±3 °C | ~ 0,11 °C | 1100 | Limitada por Ω externos | Muy buena | Oxidante |
| Termopar tipo R y S | | | 1-3 °C | ~ 0,11°C | 1600 | Limitada por Ω externos | Buena a alta temp. | Oxidante |

De igual manera, en la [tabla IV.2.](#) se muestran las ventajas y desventajas de cada tipo de instrumento de medida de temperatura.

Tabla IV.2.

Ventajas y desventajas de los transductores eléctricos de temperatura [3]

| Tipo de elemento | Ventajas | Desventajas |
|----------------------------|---|--|
| Térmico | Económico | Sistema térmico voluminoso |
| Bimetal | Económico | Medida local |
| Resistencia de Ni | Buena estabilidad, alcance estrecho | Bajo límite de temperatura, frágil |
| Resistencia de Pt | Señal salida > termopar. Mejor estabilidad. Medidas de precisión. Sensibilidad, respuesta rápida | Más caro que el termopar o el termistor frágil |
| Resistencia de Cu | Barato | Baja resistividad, baja temperatura |
| Termistor | Señal salida > termopar y sonda de resistencia. Alcance estrecho. Pequeño tamaño. Sensibilidad excelente, respuesta rápida | No lineal, alta deriva sin envejecer |
| Termopar tipo T | Alta resistencia a corrosión de humedad. Bueno en bajas temperaturas. Pequeño tamaño. Respuesta rápida | Baja temperatura máxima. Alcance amplio. Compensación unión fría. Linealidad menor que sonda de resistencia |
| Termopar tipo J | Bueno en atmósfera reductoras. Más económico. Pequeño tamaño. Respuesta rápida | Alcance amplio. Compensación unión fría. Linealidad menor que sonda de resistencia |
| Termopar tipo K | Bueno en atmósferas oxidante. Termopar más lineal. Pequeño tamaño. Respuesta rápida | Más caro que T o J. Alcance amplio. Compensación unión fría. Linealidad menor que sonda de resistencia |
| Termopar tipo R y S | Protegido es bueno en atmósferas oxidantes. Pequeño tamaño. Respuesta rápida | Más caro que K. Alcance amplio. Compensación unión fría. Linealidad menor que sonda de resistencia |

1.1.2. Características de la instalación

Una vez que se conocen las especificaciones de los distintos instrumentos de medida de temperatura, es necesario conocer las características a satisfacer de la instalación, en este caso del método T-History. De esta manera, las limitaciones del sistema de medida a emplear quedan definidas por las necesidades de la instalación.

La instalación del método está formada por una cámara aislada que, además, consta de un controlador PID para variar la temperatura dentro de la misma. Las sondas que se desean seleccionar deben registrar de manera lo más precisa posible esta temperatura [1, 2].

Por otra parte, se desea ensayar un material compuesto formado por mortero y material de cambio de fase, en este caso GR 27. Como las muestras simulan un material de construcción, el rango de temperatura al que se someterán será de 10 °C a 40°C.

Además, este material es sólido, por lo que deberá buscarse una sonda que pueda embeberse en las probetas utilizadas para los ensayos durante su fabricación o una sonda de medida superficial que se adhiera a la superficie exterior de la probeta.

En la [tabla IV.3](#), se muestran las características de la instalación.

Tabla IV.3.

Características de la instalación (elaboración propia)

| Características de la instalación |
|---|
| Rango de temperatura de 10 °C a 40 °C |
| Precisión lo más elevada posible |
| Medida de temperatura en materiales sólidos |

IV.1.3. Selección del tipo de sonda

A partir de los datos anteriores, se ha realizado una tabla multicriterio para determinar el tipo de sonda más apropiado para emplear en la instalación del método ([tabla IV.4](#)).

Este tipo de tablas sirven para determinar la opción más favorable para una determinada aplicación. La tabla consta de una serie de factores, condiciones más o menos importantes, comunes para cada una de las opciones que se valoran. Estos factores se puntúan para cada una de las posibles alternativas. La opción adecuada será la que posea una puntuación final más elevada.

Para esta selección, se han escogido como factores las características de la instalación explicadas en la sección anterior, y el requisito de que la sonda tenga un comportamiento lineal.

A continuación, se expone el criterio tomado para determinar el grado de importancia de cada uno de los factores y la puntuación asignada a cada instrumento de medida para cada caso.

- Exactitud (30 %): se ha escogido un peso relativo de 0,3 con respecto a las demás, ya que diversos autores que han estudiado el método [1, 2] han hecho referencia a la temperatura como la principal fuente de error. La puntuación asignada a cada uno de los diferentes instrumentos de medida se ha realizado según los datos de la [tabla IV.1.](#), asignando mayor puntuación a los elementos con mayor precisión y menor puntuación a los elementos con menor precisión.

Cabe destacar que en el caso de las termorresistencias existen varios tipos de montajes que afectan a la exactitud de las medidas; montaje a dos hilos, tres hilos y cuatro hilos. En las valoraciones de este tipo de instrumentos siempre se ha tenido en cuenta que fuese montaje a cuatro hilos, ya que es el utilizado para obtener la mayor precisión posible en la medida [3].

- Rango de temperatura (30 %): el peso de este factor es de 0,3. Es importante que se cumpla este factor, ya que una sonda incapaz de medir en el rango de temperaturas necesario es inútil. Por ello, se ha dado mayor puntuación a los elementos que cumplían esta condición y se ha puntuado con 0 a los instrumentos que no la cumplían. Los datos de referencia utilizados aparecen en la [tabla IV.1.](#)
- Medida en materiales sólidos (20 %): el peso es de 0,2 relativo a los demás factores. Es necesario que la sonda de temperatura sea capaz de estar en contacto con el sólido para la medición de las muestras. De igual manera que los anteriores, conforme mejor cumple la condición el instrumento, mayor puntuación se le ha asignado.
- Linealidad (20 %): el peso relativo de este factor es de 0,2. Podría emplearse una sonda que no fuera lineal para la realización de la medida de la temperatura. Sin embargo, es más cómodo y exacto emplear un instrumento que se comporte de manera lineal. La puntuación asignada a cada uno de los instrumentos sigue el patrón descrito para los demás factores.

En la [tabla IV.4.](#) se muestra el método de decisión multicriterio empleado.

Como se puede observar los instrumentos de medida que mejor puntuación obtienen son las resistencias de Platino y los termopares tipo K, si bien es cierto que las resistencias de Platino son preferibles a los termopares. Por tanto, el modelo a elegir posteriormente pertenece a una de estas dos familias.

Tabla IV.4.

Selección del tipo de instrumento de medida de temperatura

| | | Instrumentos de medida de temperatura | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------------|-------------|---------------------------------------|----------------|---------|----------------|-------------------|----------------|-------------------|----------------|-------------------|----------------|-----------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|---------------------|----------------|
| | | Térmico | | Bimetal | | Resistencia de Ni | | Resistencia de Pt | | Resistencia de Cu | | Termistor | | Termopar tipo T | | Termopar tipo J | | Termopar tipo K | | Termopar tipo R y S | |
| Factor | Peso Factor | Nota | Nota ponderada | Nota | Nota ponderada | Nota | Nota ponderada | Nota | Nota ponderada | Nota | Nota ponderada | Nota | Nota ponderada | Nota | Nota ponderada | Nota | Nota ponderada | Nota | Nota ponderada | Nota | Nota ponderada |
| Exactitud | 30% | 6 | 1,8 | 6 | 1,8 | 7 | 2,1 | 9,5 | 2,85 | 8 | 2,4 | 10 | 3 | 7 | 2,1 | 6 | 1,8 | 6 | 1,8 | 6 | 1,8 |
| Rango de temperatura | 30% | 10 | 3 | 10 | 3 | 10 | 3 | 10 | 3 | 10 | 3 | 10 | 3 | 10 | 3 | 10 | 3 | 10 | 3 | 0 | 0 |
| Medida en materiales sólidos | 20% | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 1,8 | 10 | 2 | 9 | 1,8 | 10 | 2 | 5 | 1 | 5 | 1 | 9,5 | 1,9 | 5 | 1 |
| Linealidad | 20% | 5 | 1 | 8 | 1,6 | 2 | 0,4 | 10 | 2 | 6 | 1,2 | 1 | 0,2 | 8 | 1,6 | 8 | 1,6 | 9,5 | 1,9 | 6 | 1,2 |
| Total | 100% | | 5,8 | | 6,4 | | 7,3 | | 9,85 | | 8,4 | | 8,2 | | 7,7 | | 7,4 | | 8,6 | | 4 |

IV.2. Elección del modelo de sonda de temperatura

IV.2.1. Modelos de sondas de temperatura




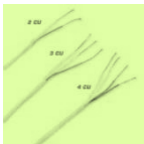

Una vez determinado el tipo de sonda adecuada para la instalación del método T-History, se realizó la búsqueda de los modelos de sondas de temperaturas en diferentes empresas proveedoras de equipos para mediciones y control de temperatura, más concretamente en Omega Engineering y TC Direct [\[4,5\]](#).


En la [tabla IV.5.](#) se muestran los distintos modelos de sondas que encajan con el perfil inicial, así como sus características.

Tabla IV.5.

Modelos de sondas de temperatura [\[4, 5\]](#)

| Modelo | Precisión | Dimensiones (L x A) o (D x L) | Precio (€) |
|---|------------------|--|-------------------|
|  Termopar con lámina adhesiva tipo K [6] | Tipo K | 25 mm x 20 mm | 7,60 |
|  Pt 100 Flexible adhesiva [7] | Clase B | 30 mm x 14 mm | 27,80 |
|  Termopar SA1XL tipo K [8] | Tipo K | 25,4 mm x 9,5 mm | 13,60 |

| | | | |
|---|------------|-------------------------------------|--------------------|
|  <p>Pt 100 de superficie [9]</p> | Clase A | 25 mm x 19 mm | 49,00 |
|  <p>Sensores de superficie RTD autoadhesivos de silicona y flexibles. Serie SA2C [10]</p> | Clase A | 35 mm x 12 mm o 15 mm x 50 mm | 36,00 |
|  <p>Elementos de Platino RTD. Serie F2020 [11]</p> <p>+</p>  <p>Cable Pt 100 de extensión para RTD's [12]</p> | Clase 1/3 | 2,1 mm x 2,3 mm | 2,30 + 3 €/m |
|  <p>Pt 100 de precisión [13]</p> | Clase 1/10 | 3 mm x 250 mm | 77,20 |

| | | | |
|--|---------|---------------|-------|
|  <p>Sonda RTD. Serie PR-10 [14]</p> | Clase A | 3 mm x 150 mm | 25,50 |
|--|---------|---------------|-------|

IV.2.2. Factores a considerar en la elección

En esta sección se explican los factores considerados para realizar la elección del modelo de sonda más adecuado para la instalación del método T-History. Al igual que en la elección del tipo de sonda estos factores serán puntuados posteriormente en una matriz multicriterio.

- Exactitud (40 %): el peso relativo asignado es de 0,4 por tratarse de un factor determinante, ya que es la principal fuente de error en el método T-History [\[1, 2\]](#).

La norma internacional IEC 751 especifica las tolerancias de los sensores RTD industriales. En la [tabla II.6.](#) se muestran las precisiones de los elementos RTD.

Tabla II.6.
Clases de precisión de los sensores RDT [\[15\]](#)

| Clase | Tolerancia a 0 °C |
|-----------------|-------------------|
| 1/10 DIN | ± 0,03 °C |
| 1/3 DIN | ± 0,10 °C |
| A | ± 0,15 °C |
| B | ± 0,30 °C |

Por otra parte, los termopares tienen una calibración tipo K. Las normas ANSI y IEC establecen los rangos de temperatura y la precisión, en la [tabla IV.7.](#) se muestra la precisión para los termopares tipo K.

Tabla IV.7.
Precisión de los termopares [\[16\]](#)

| Calibración | Límite de error estándar | Límite de error especial |
|---------------|--------------------------|--------------------------|
| Tipo K | ± 2,2 °C | ± 1,1 °C |

Por tanto, los sensores RTD con mejor precisión, es decir, clase 1/10 DIN y clase 1/3 DIN serán puntuadas con mayor valor que las clases A y B, obteniendo la peor puntuación en este factor los termopares tipo K.

- Tamaño de la sonda (30 %): el peso relativo asignado a este factor es de 0,3, es necesario que la sonda posea el tamaño adecuado para poder aplicarse a las muestras que se desean medir. Tanto si la sonda se va emplear embebida en la parte central de la probeta o adherida a la superficie de la misma, se requiere que la sonda posea las menores dimensiones posibles, ya que las muestras no poseen un tamaño elevado.

Por ello, las sondas con menores dimensiones se puntúan con mayor valor que las sondas con dimensiones elevadas.

- Coste (30 %): el peso relativo de este factor es de 0,3. Se ha tenido en cuenta la relación calidad-precio de las sondas, valorando las características técnicas de cada sonda y teniendo en cuenta que pueden utilizarse para realizar pruebas en el montaje de la instalación y que el resultado no sea el esperado, perdiendo la sonda de temperatura en la prueba.

Por ello, una sonda que tenga un menor coste con una precisión aceptable se ha puntuado con mayor valor.

IV.2.3. Selección del modelo de sonda

Para la determinación del modelo de sonda más adecuado entre los hallados en los catálogos de los diferentes proveedores, se ha realizado una matriz multicriterio valorando los factores explicados anteriormente. El modelo de sonda con una mayor puntuación será la sonda elegida para llevar a cabo la adaptación del método T-History.

En la [tabla IV.8.](#) se muestra esta matriz multicriterio.

Tabla IV.8.

Matriz multicriterio de selección del modelo de sonda de temperatura

| | | Modelo de sonda de temperatura | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|-------------|-------------------------------------|----------------|--------------------------|----------------|-----------------------|----------------|----------------------|----------------|--|----------------|---|----------------|---------------------|----------------|------------------------|----------------|
| | | Termopar con lámina adhesiva tipo K | | Pt 100 Flexible adhesiva | | Termopar SA1XL tipo K | | Pt 100 de superficie | | Sensores de superficie RTD autoadhesivos de silicona y flexibles. Serie SA2C | | Elementos de Platino RTD. Serie F2020. + Cable Pt 100 de extensión para RTD's | | Pt 100 de precisión | | Sonda RTD. Serie PR-10 | |
| Factor | Peso Factor | Nota | Nota ponderada | Nota | Nota ponderada | Nota | Nota ponderada | Nota | Nota ponderada | Nota | Nota ponderada | Nota | Nota ponderada | Nota | Nota ponderada | Nota | Nota ponderada |
| Exactitud | 40% | 5 | 2 | 7 | 2,8 | 5 | 2 | 8 | 3,2 | 8 | 3,2 | 9 | 3,6 | 10 | 4 | 8 | 3,2 |
| Dimensiones | 30% | 6 | 1,8 | 4 | 1,2 | 5 | 1,5 | 6 | 1,8 | 4 | 1,2 | 10 | 3 | 7 | 2,1 | 7 | 2,1 |
| Coste | 30% | 9 | 2,7 | 7 | 2,1 | 8 | 2,4 | 6 | 1,8 | 6 | 1,8 | 10 | 3 | 5 | 1,5 | 7 | 2,1 |
| Total | 100% | | 6,5 | | 6,1 | | 5,9 | | 6,8 | | 6,2 | | 9,6 | | 7,6 | | 7,4 |

IV.2.4. Pedido del modelo de sonda

Como se puede observar en la [tabla IV.8.](#), la sonda de temperatura con una mayor puntuación es el Elemento de Platino RTD, serie F2020 más el cable Pt 100 de extensión de RTD's. En la [tabla IV.9.](#) se detallan las características de las sondas.

Tabla IV.9.

Características de las sondas de temperatura

| Variable | Especificación |
|---|---|
| Exactitud | $\pm 0,10^{\circ}\text{C}$ |
| Rango de temperaturas | 0°C a 150°C |
| Tolerancia a la resistencia a 0°C | $\pm 0,04 \Omega$ |
| Tiempo de respuesta $t_{0,9}$ | 10 s |

Estos elementos pertenecen a la empresa Omega Engineering Limited [\[6\]](#).

Antes de realizar el pedido, se contactó con la empresa para obtener mayor información sobre ciertas cuestiones que no estaban detalladas en la información técnica del producto. A continuación, se exponen estas cuestiones con su correspondiente respuesta.

Cuestiones sobre las sondas de temperaturas

- Sobre el uso:
 - Se prefiere conexión a cuatro hilos ya que como se ha explicado anteriormente se reduce el error introducido por la resistencia de los hilos. Existe cable para conexión a cuatro hilos que ofrece el proveedor y es el que aparece en la [tabla IV.5.](#), sin embargo, los elementos que se ofrecen solo constan de dos patillas. Por ello, surge la siguiente duda, ¿es posible la conexión a cuatro hilos?

El departamento técnico de Omega Engineering corroboró que pese a que los elementos Pt 100 solo poseen dos patillas, es posible realizar conexión a cuatro hilos conectando dos hilos del mismo color a cada patilla. En este caso, se conectarían dos hilos rojos a una de las patillas y dos hilos negros a la otra patilla.

- Al ser elementos Pt 100 y no sondas ya fabricadas es necesario realizar el montaje del elemento con el cable. No se facilita ninguna información sobre su posible manipulación. Por ello, se desea conocer si es posible realizar el montaje mediante soldadura con estaño.

El montaje por soldadura con Estaño si es posible.

- ¿Son delicadas para su manipulación? Es decir, ¿se puede estropear la termo-resistencia con un uso normal?

Los elementos Pt 100 son delicados, por lo que deberán manipularse con cierto cuidado.

- Sobre el contacto térmico:

- ¿Recomiendan el uso de siliconas u otros productos que mejoren el contacto térmico del sensor de temperatura con la superficie del elemento?

Omega Engineering recomendó el emplear siliconas para mejorar el contacto entre las dos superficies.

- Precisión/calibración:

- Los elementos Pt 100 que se desean adquirir poseen una precisión clase 1/3. Como se ha detallado anteriormente, existe un rango de precisión mayor que sería la clase 1/10. Pese a que es una muy buena precisión se desea conocer si existiría la posibilidad de cambiar a una mayor precisión el elemento sensible, en este caso a clase 1/10.

Tras consultarlo con el proveedor, éstos aseguraron que no es posible la fabricación de este producto, Elementos Pt 100, con precisión clase 1/10.

- ¿Existe la posibilidad de comprar los elementos Pt 100 calibrados? En tal caso, ¿cuál sería el precio final?

Las sondas se pueden calibrar según la norma ISO9001 en 3 puntos de medición dentro del rango de temperaturas de utilización de la sonda. Sin embargo, los Elementos Pt 100 no son sondas fabricadas, por lo que no es posible adquirirlas calibradas. Lo único que la empresa puede facilitar es el certificado de conformidad del producto adquirido con la información proporcionada en la página web.

Finalmente, tras analizar la información disponible se decidió realizar el pedido a la empresa Omega Engineering. El material solicitado fueron 20 Elementos Pt 100, serie F2020, clase 1/3 DIN y una bobina de cable para extensión de señales RTD para conexión a cuatro hilos con aislante de fibra de vidrio de longitud 30 metros que se muestran en la [figura IV.2.](#)



Figura IV.2.

Material pedido a Omega Engineering. A la izquierda sondas de temperatura Pt-100, a la derecha cable de extensión para RTD's

IV.3. Verificación de las sondas de temperatura

Una vez que se disponía de las sondas Pt 100 y el cable de extensión, se soldaron con Estaño en el “Taller del Departamento de Electrónica” de la Universidad de Zaragoza.

Para comprobar el funcionamiento de las sondas de temperatura adquiridas se realizaron medidas de temperatura entre 10°C y 40°C y se compararon con la medida realizada por otra sonda de temperatura Pt 100. Las sondas fueron apantalladas utilizando papel de aluminio para disminuir el posible efecto de los gradientes de temperatura.

En la [tabla IV.10.](#) se muestra el error calculado para una confianza del 95 % en cada rango de temperatura medido. Además en las figura IV.4. se ha representado a modo de ejemplo las medidas realizadas para 20 °C con el límite superior e inferior.

Tabla IV.10.

Error para las distintas temperaturas

| Temperatura (°C) | σ | ϵ |
|------------------|----------|------------|
| 10,00 | 0,10 | 0,19 |
| 15,05 | 0,10 | 0,19 |
| 20,00 | 0,06 | 0,11 |
| 25,00 | 0,07 | 0,14 |
| 36,00 | 0,02 | 0,04 |
| 40,00 | 0,03 | 0,07 |

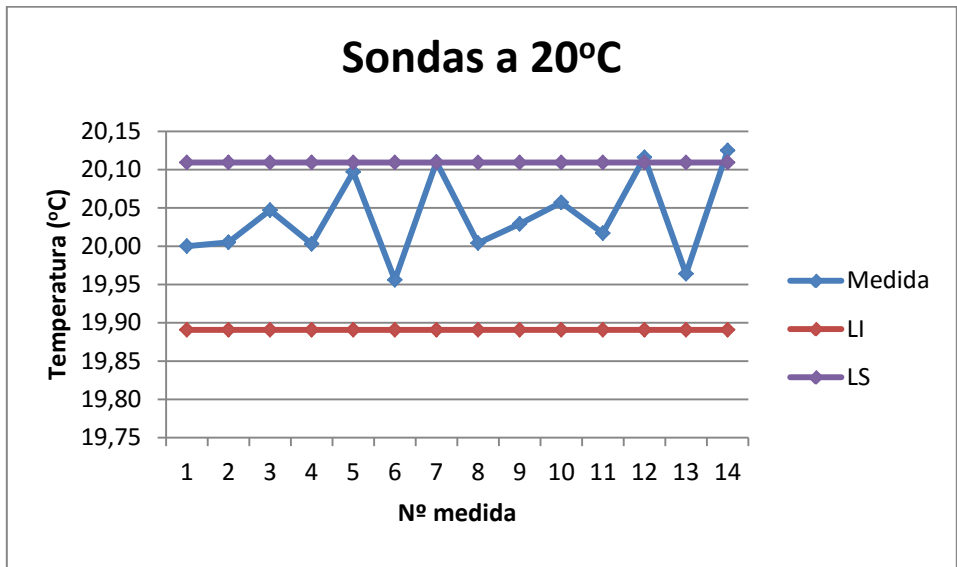


Figura IV.4.
Variabilidad de las medidas de las sondas para 20 °C

Durante la medición de las temperaturas anteriores se observó la aparición de ruido en las medidas. Así, para las sondas a una temperatura de 45 °C (ya que si es ruido térmico, éste aumenta con la temperatura) se ha realizado el cálculo de la varianza de la medida y se ha calculado el error para un intervalo de confianza del 95 %, obteniendo un resultado de $\pm 0,02$ °C. En la figura IV. 5. se ha representado el ruido de una de las sondas.

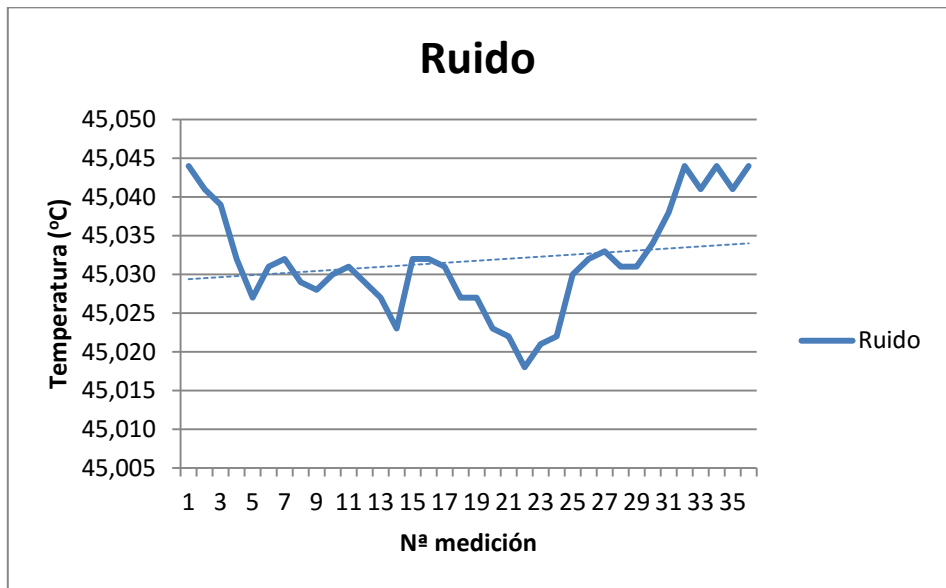


Figura. IV.5.
Ruido

Anexo-V: Elección del material de referencia

En este anexo se describen las propiedades deseadas para el material de referencia a emplear en los ensayos del método T-History. Posteriormente, se realiza un cribado de los posibles materiales a utilizar en base a dichas propiedades. En la parte final del anexo, se detalla el proveedor escogido para abastecer el material de referencia.

V.1. Propiedades deseadas para el material de referencia

Se presentan tres condiciones necesarias para la elección de un material de referencia adecuado:

1ª. Debe ser una sustancia de propiedades termofísicas bien conocidas. Más concretamente, para poder aplicar las ecuaciones del método [\[1\]](#), es necesario conocer el calor específico del material, que es la cantidad de calor que hay que proporcionar a un gramo de esa sustancia para que eleve su temperatura en un grado.

2ª. La sustancia no debe cambiar de fase durante el rango de temperaturas del ensayo, en este caso entre 10 °C y 40 °C. Esta condición deriva de la anterior ya que durante el cambio de fase el calor añadido o sustraído no cambia la temperatura en sustancias puras.

3ª. La dinámica de la curva del material de referencia y el material a ensayar deben ser lo más parecidas posibles, ya que a partir de la comparación entre curvas se determinan las propiedades de la sustancia de estudio [\[9\]](#).

La dinámica de la curva viene determinada por la [ecuación 6.1.](#) Aplicando las condiciones del método T-History; misma geometría para las probetas y mismo coeficiente de transferencia de calor, la ecuación se simplificaría obteniendo la [ecuación 6.2.](#)

$$\tau = \frac{\rho \cdot c_p \cdot r}{2 \cdot h} \quad [\text{ec. 6.1.}]$$

$$\rho \cdot c_{p,\text{hormigón}} \approx \rho \cdot c_{p,\text{referencia}} \quad [\text{ec. 6.2.}]$$

V.2. Determinación del material de referencia

Para determinar el material de referencia más apropiado se consultaron las tablas A.1. “Propiedades termofísicas de sólidos metálicos”, A.2. “Propiedades termofísicas de sólidos no metálicos” y A.3. “Propiedades termofísicas de materiales comunes”, pertenecientes al Anexo A “Propiedades termofísicas de la materia” del libro Fundamentals of Heat and Mass Transfer [\[3\]](#).

En la [tabla V.1.](#) se muestran algunos de los materiales comprobados para realizar la elección del material de referencia.

Tabla V.1.

Propiedades de los posibles materiales a emplear como referencia comparados con el hormigón

| Material | λ [W/(m·K)] | ρ [kg/m ³] | c_p [J/(kg·K)] | $\rho \cdot c_p$ [kJ/l] | $(\rho \cdot c_p)_i / (\rho \cdot c_p)_{\text{mortero}}$ |
|----------|---------------------|-----------------------------|------------------|-------------------------|--|
| Hormigón | 0,8 | 1950 | 950 | 1,85 | - |
| Vidrio | 1,4 | 2225 | 835 | 1,86 | 1,00 |
| Aluminio | 237 | 2702 | 903 | 2,44 | 1,31 |
| Cobre | 401 | 8933 | 385 | 3,44 | 1,85 |
| Acero | 66,6 | 7310 | 227 | 1,66 | 0,89 |
| Silicona | 148 | 2330 | 712 | 1,66 | 0,89 |

V.3. Pedido del material de referencia

Inicialmente, se contactó con el Servicio de Soplado de Vidrio de la Universidad de Zaragoza para solicitar varilla de vidrio maciza de dimensiones 16 mm de diámetro con longitud de 160 mm y 28 mm de diámetro con longitud de 280 mm. Sin embargo, no poseen varillas de dimensiones tan elevadas, sugiriendo realizar el pedido a la empresa Vidrasa S.A. [4].

Se estableció contacto con dicha empresa para adquirir las varillas. En la [tabla V.2.](#) se muestra la composición y las propiedades físicas del material de las varillas, Borosilicato 3.3.

Tabla V.2.

Características de las varillas de Borosilicato 3.3. [4]

| | |
|---|---|
| Composición química (% peso) | |
| SiO ₂ | 81 |
| B ₂ O ₃ | 13 |
| Na ₂ O + K ₂ O | 4 |
| Al ₂ O ₃ | 2 |
| Coefficiente medio de dilatación lineal $a_{20/300}$ según DIN 52328 | $3,3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ |
| Temperatura de transformación Tg | 525 °C |
| Temperaturas del vidrio para las viscosidades h en dPa · s: | |
| 10¹³ temperatura enfriamiento superior | 560 °C |
| 10^{7,6} temperatura reblandecimiento | 825 °C |
| 10⁴ temperatura de trabajo | 1260 °C |
| Temperatura máxima admisible para uso de corta duración | 500 °C |
| Densidad | $2,23 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ |
| Módulo de elasticidad E | $64 \cdot 10^3 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ |
| Indice de Poisson | 0,20 |
| Conductibilidad térmica l_w a 90 °C | $1,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ |
| Temperatura para resistencia eléctrica específica de $10^8 \text{ W} \cdot \text{cm}$ t_{k100} | 250 °C |
| Logaritmo de la resistencia eléctrica volumétrica (W · cm) | |

| | |
|--|--|
| a 250 °C | 8 |
| a 350 °C | 6,5 |
| Propiedades dieléctricas (1MHz, 25 °C) | |
| Permitividad | 4,6 |
| Factor de pérdida dieléctrica | $37 \cdot 10^{-4}$ |
| índice de refracción n_d ($\lambda = 587,6 \text{ nm}$) | 1,473 |
| Constante óptica de tensión (norma DIN 52314) K | $4,0 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^2 \cdot \text{N}^{-1}$ |

Debido a que no poseían varilla de diámetro 28 mm en la fábrica y era necesaria pedirla repercutiendo en los gastos de compra, se decidió comprar la varilla de 30 mm de diámetro y reducir su espesor posteriormente, solicitando los servicios del “Servicio de Soplado de Vidrio” de la Universidad de Zaragoza.

Finalmente, se realizó el pedido de una varilla de diámetro 16 mm y longitud 1500 mm, ya que es el pedido mínimo que se puede realizar, cortada a 160 mm de longitud y una varilla de 30 mm de diámetro y longitud 1500 mm cortada a 280 mm de longitud. En la [figura V.1](#). se muestran las varillas adquiridas.



Figura V.1.

Varillas de vidrio empleadas como material de referencia

Anexo-VI: Fabricación de las probetas a ensayar

Este anexo consta de dos partes en las que se describen, en primer lugar, la fabricación de los moldes necesarios para la fabricación de las probetas y en segundo lugar, el procedimiento seguido para la elaboración de las probetas necesarias para la realización de los ensayos del método T-History.

VI.1. Fabricación de los moldes

Una vez comprados los tubos de PVC, se llevaron al “Taller del Departamento de Ingeniería Mecánica” de la Universidad de Zaragoza, donde se cortaron a una longitud de 180 mm los tubos de 16 mm de diámetro interno y a una de longitud de 300 mm los tubos de 28 mm de diámetro interno.

Posteriormente, se realizó una prueba cortando transversalmente uno de los tubos obtenidos. Se volvió a unir y se comprobó con un calibre que la dimensión final del diámetro interior se reducía en menos de 0,5 mm., así como que ambas partes del tubo coincidían bien.

Realizadas las anteriores comprobaciones, se decidió fabricar cuatro moldes de cada uno de los tipos de dimensiones, realizando el corte longitudinal del tubo y marcando cada uno de los moldes con un número. El resultado se puede observar en la [figura VI.1.](#)



Figura VI.1.
Moldes de tubo de PVC

Con respecto a la unión del molde, inicialmente se pensó en utilizar bridas. Sin embargo, la relación longitud/diámetro de los moldes es muy elevada, lo que implica no sea posible usar una o varias bridas ya que son muy finas y el molde no queda firmemente unido. Finalmente, se decidió emplear cinta aislante para unir las dos partes del molde.

La base del molde se realizó con poliestireno extruido, introduciendo el molde ya unido a presión. En la [figura VI.2.](#) se muestra el molde final que se empleará en la fabricación de las probetas.



Figura VI.2.
 Molde final empleado para la fabricación de las probetas

VI.2. Proceso de fabricación de las probetas

VI.2.1. Descripción de los materiales a emplear

Los materiales empleados para la fabricación del mortero serán cemento, arena y agua. También se empleará el PCM objeto de estudio Rubitherm GR27. A continuación se describen brevemente estos materiales.

- Cemento

El cemento es un conglomerante hidráulico que se utiliza para fabricar morteros y hormigón. La pasta de cemento fragua y endurece por hidratación al aire.

Existen distintos tipos de cementos, en la [tabla VI.1.](#) se muestra una clasificación de los tipos de cementos según la norma UNE-EN 197-1:2011 [\[4\]](#).

Tabla VI.1.

Tipos de cemento elaboración propia en base a [\[4\]](#)

| Tipos de Cemento | Denominaciones | Designaciones |
|------------------|---|---------------|
| I | Cemento Portland | CEM I |
| II | Cemento Portland con adiciones | CEM II |
| III | Cemento Portland con escorias de alto horno | CEM III |
| IV | Cemento puzolánico | CEM IV |
| V | Cemento compuesto | CEM V |

Habitualmente, el tipo de cemento utilizado en aplicaciones de construcción cuando no se especifican características adicionales especiales es el tipo CEM II. Por ello, para la fabricación de las probetas, se ha escogido el cemento CEM II/B-M con una resistencia normal inicial de 32.5 N/mm^2 .

- Áridos

Los áridos son fragmentos de roca, gravas y arenas. Constituyen la estructura granular de los morteros y hormigones, cuyos huecos deben rellenarse lo máximo posible con la pasta conglomerante.

La principal diferencia entre un hormigón y un mortero estriba en el tamaño de árido. Mientras que el mortero se prepara con cemento, arena y agua, el hormigón también utiliza además de los componentes del mortero, gravas.

En este caso, para la fabricación del mortero se ha empleado arena fina.

- Agua

La misión principal del agua de amasado es la de hidratar los componentes activos del cemento y conseguir la trabajabilidad necesaria de la pasta de mortero.

Además, según la Ley de Adams (1919), la dosis de este elemento es determinante para la resistencia del mortero y el hormigón [5]. En la [figura VI.3.](#) se muestra como varía la resistencia final en función del cociente Agua/Cemento.

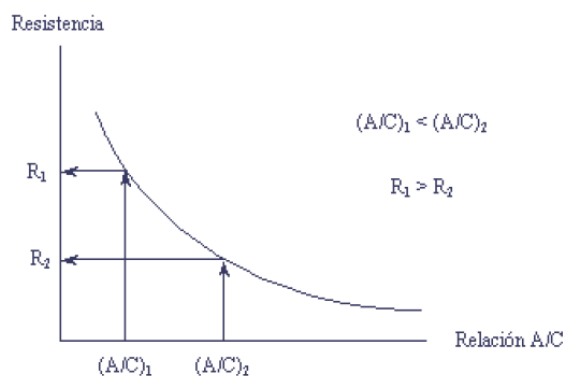


Figura VI.3. Resistencia versus relación A/C [5]

Siguiendo las especificaciones de la norma UNE-EN 196-1, el agua utilizada debe estar libre de sustancias en suspensión para no alterar el fraguado del cemento, así que se considera el agua potable como válida para el agua de amasado [1].

- PCM

El material de cambio de fase empleado es el Rubitherm GR27 disponible en el “Laboratorio de Determinación de Propiedades Termofísicas” de la Universidad de Zaragoza.

En la [tabla VI.4.](#) se muestran las propiedades de este material.

Tabla VI.4.
Propiedades del PCM GR27 []

| Propiedad | Valor |
|---|-------|
| Densidad (kg/l) | 0,75 |
| Temperatura de cambio de fase (°C) | 28 |
| Conductividad térmica (W/m·K) | 0,2 |
| Calor específico (kJ/kg·K) | 1,5 |
| Capacidad de almacenamiento térmico entre 19°C y 34°C (kJ/kg) | 72 |

VI.2.2. Elaboración de un Plan de Fabricación

Una vez fabricados los moldes para la preparación de las muestras, se ha elaborado un posible procedimiento experimental fabricación y validación de las muestras. Debido a la falta de experiencia y de referencias bibliográficas en la fabricación de probetas con PCM, se decidió realizar las primeras muestras sólo de hormigón. A continuación, se detalla el procedimiento establecido.

Plan de Fabricación

1. Elaboración de probetas sin PCM

El número de moldes disponibles de cada una de las dimensiones deseadas de probeta son cuatro. Debido al desconocimiento del posible resultado de las probetas al realizar el desencofrado; estado de los extremos de las probetas, dimensiones finales, comportamiento de los moldes, etc., se ha fijado un número inicial de probetas sin PCM de dos para cada una de las dimensiones de fabricación.

Estas probetas serán fabricadas únicamente utilizando cemento, áridos y agua, para evitar la posible pérdida de PCM si no se obtuviera el resultado deseado.

El procedimiento a seguir en la elaboración de estas probetas se detalla a continuación.

1.1. Establecer la dosificación entre materiales

A partir de la bibliografía consultada [1; 6] se ha establecido una dosificación inicial de los materiales a utilizar. Sin embargo, ésta podrá ser modificada durante el proceso de fabricación de las muestras si se observaran características no deseadas en el mortero.

- Relación árido/cemento 1:4
- Relación agua/cemento: 0,2

1.2. Pesado de los materiales en la báscula.

Los materiales utilizados para la conformación de las probetas serán pesados en una báscula con sensibilidad de 0,01 gramos del “Laboratorio de Determinación de Propiedades Termofísicas” del Área de Máquinas y Motores Térmicos de la Universidad de Zaragoza.

El pesado de cada uno de los componentes se realizará por separado.

1.3. Vertido y mezclado de los materiales

En este caso, se depositarán cemento y áridos en el recipiente de mezclado. Este recipiente tiene una capacidad máxima de 5 litros.

Una vez depositados, se removerán con la ayuda de una espátula hasta que se aprecie una distribución más o menos uniforme.

Posteriormente, se añadirá la dosis de agua determinada y se continuará removiendo con la espátula hasta obtener una mezcla de aspecto homogéneo.

Si la pasta quedase demasiado seca, se podría aumentar la cantidad de agua a añadir para mejorar la trabajabilidad. De igual manera, si al echar el agua se observase que es demasiada, se podría no añadir toda la cantidad propuesta inicialmente.

1.4. Llenado de los moldes

Una vez realizada la mezcla y obtenidas una homogeneidad y trabajabilidad adecuadas, se procederá al llenado de los moldes.

Con ayuda de la espátula y una cuchara, se rellenan los moldes. Alternando con suaves golpes del molde contra la mesa para ayudar a asentar la pasta dentro del molde y expulsar posibles burbujas de aire atrapadas durante el llenado.

1.5. Desmoldado y limpiado de moldes.

Según la Norma UNE-EN 12390-2:2009 [7], las probetas podrán extraerse de los moldes una vez transcurridas 16 horas y no más de tres días. La temperatura a la que se deben conservar los moldes es a 25 ± 5 °C.

Inicialmente, se fija este periodo en 24 horas. Sin embargo, si se observa demasiada humedad se puede alargar este periodo.

El lugar de almacenamiento de las probetas será el “Laboratorio de Determinación de Propiedades Termofísicas” de la Universidad de Zaragoza.

Después de desmoldar las probetas, despegando la cinta aislante del molde y separando las dos mitades, los moldes se lavan con agua y jabón para poder ser reutilizados.

1.6. Fraguado de las probetas

Finalmente, el periodo de fraguado de las probetas es de 28 días para terminar de adquirir resistencia y perder agua.

1.7. Cuestiones a considerar

Durante el proceso de fabricación de la probeta sin PCM, se valorarán ciertos aspectos descritos a continuación, con el fin de realizar posibles mejoras antes de utilizar PCM en la fabricación de las probetas.

- Facilidad de desmoldado: necesidad de utilizar líquido desencofrante si se observase que la probeta se pega a la pared del molde.
- Agua adicionada: determinar si se consigue una buena trabajabilidad del mortero con la dosificación propuesta o por el contrario, es necesario modificarla.
- Necesidad de modificar la dosificación de áridos: valoración visual de la consistencia adquirida por el mortero.
- Dimensiones y forma de la probeta: comprobación de la longitud de las probetas, así como la forma final de las probetas teniendo en cuenta formación de rebabas, deformaciones, aire ocluido y cualquier otro defecto que pueda observarse. Valoración de las posibles deformidades y aceptación o rechazo del diseño del molde y del proceso de fabricación.

2. Preparación de muestras con PCM

Después de haber realizado las comprobaciones anteriores, se procederá a la fabricación de las probetas empleando cemento, áridos, agua y PCM.

Se propone la fabricación inicial de dos probetas de cada tamaño para valorar posibles efectos no considerados al emplear PCM.

El procedimiento a seguir en este caso se detalla en los siguientes apartados.

2.1. Establecer la dosificación entre materiales

- Relación áridos/cemento: la dosificación empleada será la determinada válida en la conformación de las probetas sin PCM menos el porcentaje en peso de la cantidad de PCM empleada.
- Relación cemento/agua: la dosificación empleada será la determinada válida en la conformación de las probetas sin PCM pudiendo ser modificada con el fin de mejorar la trabajabilidad de la mezcla.
- Porcentaje en peso de PCM empleado: inicialmente, se empleará un porcentaje en peso sobre el total de la probeta del 10 %. Una vez obtenidas este tipo de probetas, se utilizará un porcentaje del 25 %.

2.2. Procedimiento de fabricación similar al inicial

La fabricación de las probetas con PCM se realizará conforme al procedimiento descrito en la preparación de probetas únicamente de mortero.

VI.2.2. Aplicación y mejoras del Plan de Fabricación

A continuación, se describe la aplicación del plan de fabricación de las probetas anteriormente descrito.

Plan de Fabricación

1. Elaboración de probetas sin PCM

A partir de las dimensiones calculas previamente, se ha determinado la masa de las probetas. Este cálculo se muestra en la [tabla VI.5.](#)

Tabla VI.5.

Determinación del peso de las probetas

| Cálculo masa probetas | | | | | |
|-----------------------|-----------|--------------|---------------------------|-------------------------------|----------|
| Diámetro (m) | Radio (m) | Longitud (m) | Volumen (m ³) | Densidad (kg/m ³) | Masa (g) |
| 0,016 | 0,008 | 0,180 | 3,619E-05 | 1560 [34] | 56,458 |
| 0,028 | 0,014 | 0,300 | 1,847E-04 | | 288,172 |

Conocido este dato y el número de probetas que se quieren fabricar inicialmente (en este caso, 2 grandes y 2 pequeñas), se ha aplicado la dosificación propuesta para conocer la cantidad necesaria en gramos de cada componente.

En la [tabla VI.6](#) se muestra la cantidad necesaria de cada componente calculada con un exceso del 30 %.

Tabla VI.6.

Cálculo de las cantidades para los componentes del mortero

| | Peso (g) | Cemento (g) | Áridos (g) | Agua (g) |
|--------------------------|-----------------|--------------------|-------------------|-----------------|
| Diámetro 16 mm | 56,46 | 18,35 | 55,05 | 15,60 |
| Diámetro 28 mm | 288,17 | 93,66 | 280,97 | 79,61 |
| Total⁶ | 689,26 | 224,01 | 672,03 | 190,41 |

A continuación, se realizó el pesado de los componentes a añadir.

El procedimiento empleado consistió en realizar una primera pesada del componente en un recipiente, vaciarlo en el recipiente de mezcla y realizar una nueva pesada del recipiente para descontar el posible residuo de las paredes. Este procedimiento se repitió hasta aproximarse a la cantidad necesaria calculada para cada uno de los componentes.

En la [tabla VI.7](#) se muestran las cantidades para cada uno de los componentes de la mezcla.

Tabla VI.7.

Cantidades añadidas para cada uno de los componentes

| Componente | Nº pesada | Masa inicial (g) | Residuo (g) | Masa final (g) | Total (g) |
|-------------------|------------------|-------------------------|--------------------|-----------------------|------------------|
| Cemento | 1 | 192 | 1 | 191 | 227 |
| | 2 | 37 | 1 | 36 | |
| Áridos | 1 | 245 | 3 | 242 | 670,5 |
| | 2 | 233 | 4 | 229 | |
| | 3 | 204 | 4,5 | 199,5 | |
| Agua | 1 | 119,1 | 0,7 | 118,4 | 193,4 |
| | 2 | 75 | 0 | 75 | |

⁶ Total calculado para dos probetas de diámetro 16 mm más dos probetas de diámetro 28 mm.

Una vez pesados los componentes y depositados en el recipiente de mezcla, se removi6 hasta adquirir una consistencia aparentemente homog6nea como se muestra en la [figura VI.4.](#)



Figura VI.4.
Apariencia de la mezcla de mortero

Finalmente, se procedi6 al llenado de los moldes.

Transcurridas 24 horas desde el llenado de los moldes, se procedi6 a su apertura para la extracci6n de las probetas. No existi6 ning6n problema en el desmoldado por lo que no es necesaria la aplicaci6n de un l6quido desencofrante. En la [figura VI.5.](#) se muestra el resultado obtenido.

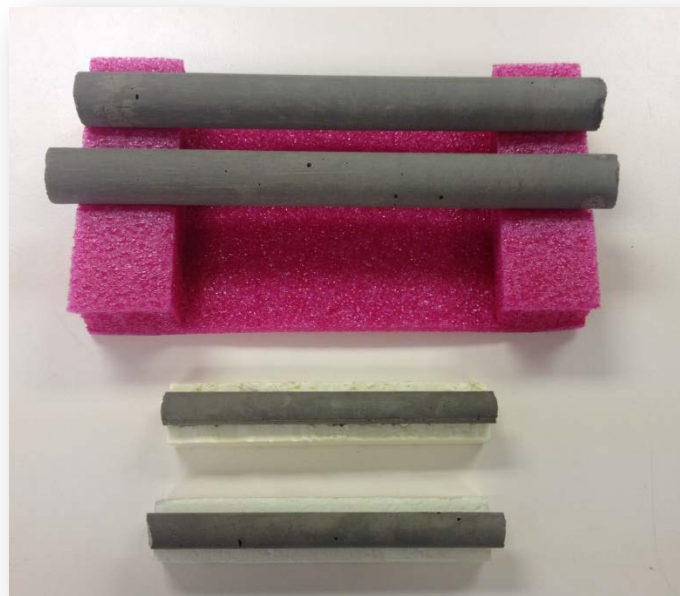


Figura VI.5.
Probetas de mortero

Como puede observarse, no existen deformaciones ni defectos en la superficie de las probetas y las dimensiones obtenidas son adecuadas a las calculadas. Por tanto, se continuó con la fabricación de las probetas empleando PCM.

2. Preparación de muestras con PCM

Imitando el procedimiento seguido anteriormente, se realizó el cálculo teórico de las cantidades necesarias para cada uno de los componentes. Esta vez se empleó un exceso del 40 %, ya que en la fabricación anterior el material había quedado muy justo.

En la [tabla VI.8.](#) se muestra el cálculo de las cantidades necesarias para la mezcla con un 10 % en peso de PCM.

Tabla VI.8.

Cálculo de cantidades para la mezcla con 10 % en peso de PCM

| | Peso⁷ (g) | Cemento (g) | Áridos (g) | 10 % PCM (g) | Agua (g) |
|--------------------------|---------------------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------|
| Diámetro 16 mm | 56,46 | 19,76 | 51,38 | 7,90 | 16,80 |
| Diámetro 28 mm | 288,17 | 100,86 | 262,24 | 40,34 | 85,73 |
| Total⁸ | 689,26 | 241,24 | 627,23 | 96,50 | 205,05 |

A continuación, se realizó el pesado de los componentes. En la [tabla VI.9.](#) se muestran las cantidades de componentes que se emplearon.

Tabla VI.9.

Cantidades añadidas para cada uno de los componentes para 10 % de PCM

| Componente | Nº pesada | Masa inicial (g) | Residuo (g) | Masa final (g) | Total (g) |
|-------------------|------------------|-----------------------------|------------------------|---------------------------|----------------------|
| PCM | 1 | 96,27 | 0,1 | 96,17 | 96,17 |
| Cemento | 1 | 242,1 | -0,1 | 242,2 | 242,2 |
| Áridos | 1 | 250,3 | 0 | 250,3 | 626,4 |
| | 2 | 237,2 | 0,1 | 237,1 | |
| | 3 | 139,2 | 0,2 | 139 | |
| Agua | 1 | 204,59 | 1,2 | 203,39 | 237,29 |

⁷ Se ha considerado válida para los cálculos de este caso, la masa de las probetas calculada para la fabricación de las probetas prototipo.

⁸ Total calculado para dos probetas para cada una de las dimensiones

| | | | | | |
|--|---|------|---|------|--|
| | 2 | 34,9 | 1 | 33,9 | |
|--|---|------|---|------|--|

Como puede se puede observar, se empleó aproximadamente un 15 % de exceso en agua respecto al calculado inicialmente para mejorar la trabajabilidad de la mezcla.

Una vez llenados los moldes, se dejaron fraguar 48 horas, ya que debido al exceso de agua, se apreciaban húmedas.

Cuando se procedió al desmoldado de las probetas, solo se pudo obtener una de dimensión 28 mm de diámetro, habiéndose fracturado todas las restantes. En la [figura VI.6.](#) se pueden observar las probetas fracturadas.



Figura VI.6.

Probetas fracturadas con 10 % de PCM

Como puede observarse en la figura anterior, la distribución del PCM en la sección de la probeta parece homogénea y aleatoria.

Para solucionar este problema, se decidió ajustar la cantidad de agua añadida reduciéndola hasta ajustarla al teórico a costa de perder trabajabilidad, ya que el agua es el principal factor determinante de la resistencia. Además, debido a la fragilidad de las probetas pequeñas, se decidió intentar fabricar una “probeta armada”.

En esta segunda fabricación, se utilizó un molde grande y tres pequeños, utilizando uno de los pequeños para la prueba de “probeta armada”.

El procedimiento empleado para la fabricación sigue la línea anterior, la única modificación es la introducción del alambre en el molde una vez que este se encuentra lleno con la mezcla.

En la [figura VI.7.](#), se puede observar el resultado de este montaje.



Figura VI.7.
Montaje para la “probeta armada”

Así mismo, en la [tabla VI.10.](#) y la [tabla VI.11.](#), se muestran las cantidades calculadas y las empleadas para la fabricación de las probetas.

Tabla VI.10.

Cálculo de cantidades para la mezcla con 10 % en peso de PCM. Segunda fabricación

| | Peso (g) | Cemento (g) | Áridos (g) | 10 % PCM (g) | Agua (g) |
|---------------------------|---------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------|
| Diámetro 16 mm | 56,46 | 59,28 | 154,13 | 23,71 | 50,39 |
| Diámetro 28 mm | 288,17 | 100,86 | 262,24 | 40,34 | 85,73 |
| Total | 457,546 | 160,14 | 416,37 | 64,06 | 136,12 |

Tabla VI.11.

Cantidades añadidas para cada uno de los componentes para 10 % de PCM. Segunda fabricación

| Componente | nº pesada | Masa inicial (g) | Residuo (g) | Masa final (g) | Total (g) |
|-------------------|------------------|-------------------------|--------------------|-----------------------|------------------|
| PCM | 1 | 63,76 | 0,08 | 63,68 | 63,68 |
| Áridos | 1 | 157,34 | 0,26 | 157,08 | 415,12 |
| | 2 | 258,22 | 0,18 | 258,04 | |
| Cemento | 1 | 161,62 | 0,87 | 160,75 | 160,75 |
| Agua | 1 | 90,02 | -3,39 | 93,41 | 149,46 |
| | 2 | 28,28 | -3,35 | 31,63 | |
| | 3 | 21,06 | -3,36 | 24,42 | |

Como puede observarse, el exceso de agua se redujo hasta aproximadamente el 10 %.

Los moldes llenos se dejaron fraguar 24 horas. Transcurrido este tiempo, se procedió al desmoldado. En este caso, se fracturaron dos de las probetas de menos dimensión quedando en buen estado la probeta de diámetro 28 mm y la “probeta armada”.

En la [figura VI.8.](#) se muestra el resultado de las probetas no fracturadas.



Figura VI.8.

Probetas no fracturadas; arriba “probeta armada”, abajo probeta de diámetro 28 mm

Debido a la fragilidad de las muestras, se decidió no elaborar la mezcla con 25 % de PCM.

Referencias

- [1] Yinping Z, Yi J, Yi J. A simple method, the T-history method, of determining the heat of fusion, specific heat and thermal conductivity of phase-change materials. *Measurement Science and Technology* 1999;10:201–5.
- [2] Lázaro A, Günther E, Mehling H, Hiebler S, Marín JM, Zalba B. Verification of a T-history installation to measure enthalpy versus temperature curves of phase change materials. *Measurement Science and Technology* 2006;17:2168–74.
- [3] Creus Solé, Antonio. Instrumentación industrial. 4ª edición, 1989. MARCOMBO, S.A.
- [4] <http://es.omega.com/>
Fecha última revisión: 01/11/2015
- [5] <http://www.tcdirect.es/default.aspx>
Fecha última revisión: 01/11/2015
- [6] http://www.tcdirect.es/Default.aspx?level=2&department_id=180/22
Fecha última revisión: 01/11/2015
- [7] http://www.tcdirect.es/Default.aspx?level=2&department_id=230/24
Fecha última revisión: 01/11/2015
- [8] <http://es.omega.com/pptst/SA1XL.html>
Fecha última revisión: 01/11/2015
- [9] <http://es.omega.com/pptst/SA1-RTD.html>
Fecha última revisión: 01/11/2015
- [10] http://es.omega.com/pptst/SA2C_SA2F-RTD.html
Fecha última revisión: 01/11/2015
- [11] http://es.omega.com/pptst/F1500_F2000_F4000.html
Fecha última revisión: 01/11/2015
- [12] http://es.omega.com/pptst/EXGG-2CU_3CU_WIRE.html
Fecha última revisión: 01/11/2015
- [13] http://www.tcdirect.es/Default.aspx?level=2&department_id=230/21
Fecha última revisión: 01/11/2015
- [14] <http://es.omega.com/pptst/PR-10.html>

[Fecha última revisión: 01/11/2015](#)

[15] <http://es.omega.com/prodinfo/pt100.html>

[Fecha última revisión: 01/11/2015](#)

[16] <http://es.omega.com/prodinfo/termopares.html>

[Fecha última revisión: 01/11/2015](#)