



**Universidad**  
Zaragoza

## Trabajo Fin de Grado

Título del trabajo:

Metodología T-History para la determinación de curvas entalpía-temperatura de materiales compuestos para aplicaciones de construcción. Ensayos y análisis de resultados.  
(Anexos)

Autor:

Javier Ordóñez García  
Grado en Ingeniería Mecánica

Directores:

Belén Zalba Nonay  
Javier Mazo Olarte

Dpto. de Ingeniería Mecánica

Escuela de Ingeniería y Arquitectura (EINA)  
Abril de 2016

## ÍNDICE:

### Contenido

|  |    |
|--|----|
| ÍNDICE:.....   | 1  |
| Anexo I. Conceptos básicos.....  | 3  |
| I.1 Definiciones .....   | 3  |
| Anexo II. Procesos físicos y su implementación EES.....  | 4  |
| II.1 Procesos físicos .....  | 4  |
| II.2 Código EES para la probeta sin aislar.....  | 4  |
| II.3 Código EES para la probeta aislada .....  | 5  |
| Anexo III. Optimización del proceso de elaboración de probetas cilíndricas de mortero con PCM para el método T-history ..... | 8  |
| III.1 Objeto .....   | 8  |
| III.2 Justificación .....  | 8  |
| III.2.1 El proceso desarrollado por Vijuesca .....   | 8  |
| III.3 Evolución de la solución .....   | 10 |
| III.3.1 Utillaje de poliamida.....   | 10 |
| III.3.2 Utillaje con tubo de aluminio y peana de poliamida.....  | 11 |
| III.3.3 Solución definitiva, El molde de poliamida.....  | 12 |
| III.4 Presupuesto y Elaboración.....   | 14 |
| III.5 Conclusión del diseño y fabricación .....  | 15 |
| III.6 Primer intento de fabricación de las probetas y conclusiones.....  | 15 |
| Anexo IV. Plantilla de Ensayo .....  | 17 |
| Anexo V. Instrumentación .....   | 18 |
| Anexo VI. Tratamiento de datos.....  | 20 |
| Anexo VII. Ensayos realizados .....  | 22 |
| VII.1 Ensayos T-history .....  | 22 |
| VII.1.1 Ensayo 0 (Observar la reproducibilidad del ensayo).....  | 22 |
| VII.1.2 Ensayo 1 (Ver efecto al aumenta la fracción másica de PCM por probeta).....  | 23 |
| VII.1.3 Ensayos 2, 3, 4 y 5(Observar los gradientes de temperatura) .....  | 24 |
| VII.1.4 Ensayo 7 (Observar los gradientes con la cámara termográfica) ..   | 28 |
| VII.1.5 Ensayo 8 (Aislamiento total de las probetas) .....   | 28 |
| VII.1.6 Tabla resumen de los ensayos.....  | 30 |
| VII.2 Otros ensayos .....  | 31 |
| VII.2.1 Ensayo de obtención el tiempo de respuesta de las sondas .....   | 31 |
| Anexo VIII. Análisis multidimensional producto .....   | 33 |
| VIII.2 Código EES:.....  | 34 |
| VIII.3 Evolución de la temperatura en diferentes puntos .....  | 36 |

|                    |    |
|--------------------|----|
| Nomenclatura.....  | 38 |
| Bibliografía ..... | 40 |

## Anexo I. Conceptos básicos

### I.1 Definiciones

#### Conductividad Térmica ( $\lambda$ ) [W/(m·K)]:

Propiedad termofísica que se deduce de la Ley de Fourier o ley cinética de la conducción:

$$\vec{q}'' = -\lambda \vec{\nabla} T \quad (\text{ec. I.1})$$

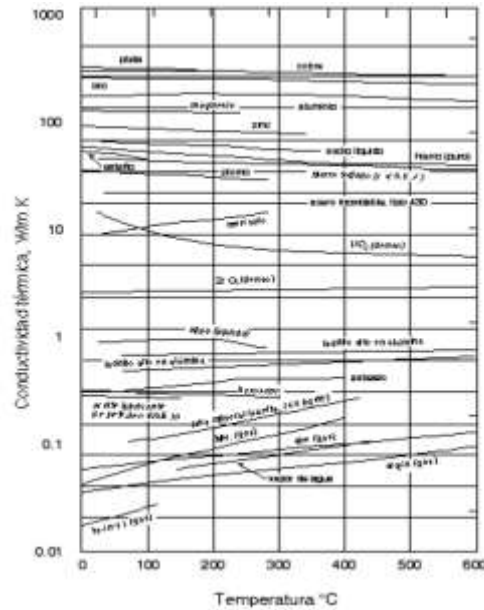


Figura I.1. Dependencia de la conductividad térmica con la temperatura [3]

Con  $\vec{q}''$  [W/m<sup>2</sup>] el flujo de calor en un punto y  $\vec{\nabla} T$  [K] el gradiente de temperaturas en un punto.

Aunque se suele suponer constante, la verdad es que como cualquier propiedad termofísica de la materia depende de la temperatura y de la presión. A pesar de que la dependencia con ésta última es débil con la temperatura no pasa lo mismo como se puede observar en esta tabla.

#### Calorimetría diferencial de barrido (DSC):

Es una técnica termoanalítica para la determinación de temperaturas de transformación y de la entalpía de sólidos y líquidos como función de la temperatura. Para lo que, tanto la muestra como la referencia se mantienen casi a la misma temperatura durante todo el experimento, por lo que el flujo de calor podrá ser medido.

El problema de esta técnica reside en que la muestra a ensayar no es representativa ya que se usan porciones del material muy pequeñas, entonces para una mezcla como la utilizada en este trabajo (PCM- mortero) en la que no se puede controlar la homogeneidad de la mezcla no sería útil, aunque sí será necesaria para calcular las propiedades de la referencia.

## Anexo II. Procesos físicos y su implementación EES

### II.1 Procesos físicos

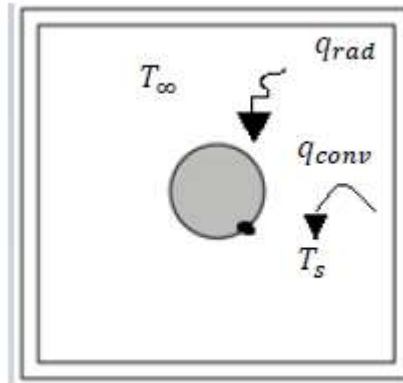


Figura II.1 Esquema de los procesos físicos [1]

Tal y como se observa se producen dos modos de transferencia de calor convección y radiación, luego el coeficiente de transferencia total  $h_t$  se define como:

$$h_t = h_{conv} + h_{rad} \quad \text{ec. II.1}$$

Para calcular el coeficiente de radiación se usa la ley de Stefan-Boltzman:

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

Para el coeficiente de convección se tendrá que utilizar el número adimensional Nusselt:

$$Nu = \frac{h_{conv} D}{\lambda} \quad \text{ec. II.3}$$

$$Nu = \left( 0,6 + \frac{0,387 Ra_D^{\frac{1}{4}}}{\left( 1 + \left( \frac{0,559}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{8}{27}}} \right)^2 \quad \text{ec. II.4}$$

Con:

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad \text{ec. II.5}$$

$$Ra = \frac{g \beta (T_s - T_a) D^3}{\nu \alpha} \quad \text{ec. II.6}$$

### II.2 Código EES para la probeta sin aislar

$$T_a = 273 \quad [\text{K}]$$

$$T_p = \frac{T_s + T_a}{2} \quad [\text{K}]$$

$$P = 101325 \quad [\text{Pa}]$$

$$D = 0,016 \quad [\text{m}]$$

$$k_{probeta} = 0,8$$

$$\beta = \beta (\text{Air}_{ha} ; T = T_p ; P = P)$$

$$\mu = \text{Visc} (\text{Air} ; T = T_p)$$

$$\rho = \rho (\text{Air} ; T = T_p ; P = P)$$

$$k = \mathbf{k} (\text{Air} ; T = T_p)$$

$$\rho = \mathbf{Cp} (\text{Air} ; T = T_p)$$

$$\varepsilon = 0,05$$

$$Pr = \mathbf{Pr} (\text{Air} ; T = T_p)$$

$$NUS_D = \frac{h_{conv} \cdot D}{k}$$

$$NUS_D = \left[ 0,6 + \frac{0,387 \cdot Ra_D^{(1/6)}}{\left( 1 + \left[ \frac{0,559}{Pr} \right] \left[ \frac{9}{16} \right] \right)^{\left( \frac{8}{27} \right)}} \right]^2$$

$$v = \frac{\mu}{\rho}$$

$$\alpha = \frac{k}{cp \cdot \rho}$$

$$Ra_D = \frac{9,807 \text{ [m/s}^2] \cdot \beta \cdot [|T_s - T_a|] \cdot D^3}{v \cdot \alpha}$$

$$h_{rad} = \varepsilon \cdot 5,670E-08 \text{ [W/m}^2\text{-K}^4] \cdot (T_a^2 + T_s^2) \cdot (T_a + T_s)$$

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

$$\frac{h_{total} \cdot \frac{D}{2}}{k_{probeta}} = Bi$$

### II.3 Código EES para la probeta aislada

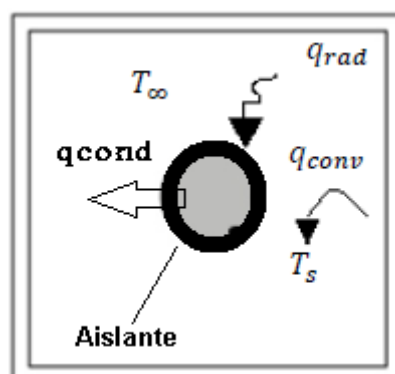


Figura II.2 Esquema de los procesos físicos con aislante

En este caso hay que añadir la resistencia de conducción ejercida por el aislante la cual se define como:

$$R_{cond} = \frac{\ln\left(\frac{r_{ext}}{r_{int}}\right)}{2\pi\lambda} \quad \text{ec II.7}$$

Quedando así el coeficiente de transferencia de calor:

$$U = \frac{1}{r_{int}2\pi(R_{cond}+R_{conv-rad})} \quad \text{ec II.8}$$

Y finalmente el número de Biot:

$$Bi = \frac{U_{eq}r}{\lambda} \quad \text{ec II.9}$$

$$T_a = 273 \text{ [K]}$$

$$P = 101325 \text{ [Pa]}$$

$$k_{pcm} = 0,8 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$$

$$k_{aislante} = 0,03 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$$

$$k = \mathbf{k} \text{ ( Air ; } T = T_a \text{ )}$$

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

$$c_p = \mathbf{Cp} \text{ ( Air ; } T = T_a \text{ )}$$

$$c_{p\text{aislante}} = 1450 \text{ [J/kg}\cdot\text{K]}$$

$$c_{p\text{muestra}} = 1080 \text{ [J/kg}\cdot\text{K]}$$

$$\varepsilon = 0,9$$

$$\mu = \mathbf{Visc} \text{ ( Air ; } T = T_a \text{ )}$$

$$\rho = \rho \text{ ( Air ; } T = T_a \text{ ; } P = P \text{ )}$$

$$\rho_{muestra} = 1560 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$rel_{radios} = \frac{r_{ext}}{r_{int}}$$

$$r_{int} = \frac{8}{1000}$$

$$e_{aislante} = 0,003$$

$$r_{ext} = r_{int} + e_{aislante}$$

$$R_{cond} = \frac{\ln ( rel_{radios} ) \cdot 100}{2 \cdot 3,142 \cdot k_{aislante} \cdot 100}$$

$$NUS_D = \frac{h_{conv} \cdot 2 \cdot r_{ext}}{k}$$

$$NUS_D = \left[ 0,6 + \frac{0,387 \cdot Ra_D^{(1/6)}}{\left( 1 + \left[ \frac{0,559}{Pr} \right] \left[ \frac{9}{16} \right] \right)^{\left( \frac{8}{27} \right)}} \right]^2$$

$$Pr = \mathbf{Pr} \text{ ( Air ; } T = T_a \text{ )}$$

$$v = \frac{\mu}{\rho}$$

$$\alpha = \frac{k}{c_p \cdot \rho}$$

$$Ra_D = \frac{|9,807 \text{ [m/s}^2] \cdot \beta \cdot [|T_s - T_a|] \cdot (2 \cdot r_{ext})^3|}{\nu \cdot \alpha}$$

$$h_{rad} = \varepsilon \cdot 5,670E-08 \text{ [W/m}^2\text{-K}^4] \cdot (T_a^2 + T_s^2) \cdot (T_a + T_s)$$

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

$$R_{convrad} = \frac{1}{2 \cdot 3,142 \cdot r_{ext} \cdot h_{convrad}}$$

$$U_{eq} = \frac{1}{2 \cdot 3,142 \cdot r_{int} \cdot (R_{cond} + R_{convrad})}$$

$$\frac{U_{eq} \cdot r_{int}}{k_{pcm}} = Bi$$



## Anexo III. Optimización del proceso de elaboración de probetas cilíndricas de mortero con PCM para el método T-history

### III.1 Objeto

Se realiza este estudio de mejora para optimizar el proceso de elaboración de probetas de mortero con PCM de dos tamaños. Las que se denominarán:

Pequeñas: Diámetro: 16 mm; Longitud: 180 mm. Grandes: Diámetro: 28 mm; Longitud: 300 mm

De manera que se consiga reducir el tiempo de elaboración, disminuir el porcentaje de probetas defectuosas y aumentar la sencillez del método.

### III.2 Justificación

Se ha decidido llevar a cabo este estudio para mejorar el método de fabricación de probetas, donde se intenta buscar soluciones para suplir una serie de desventajas y limitaciones que derivaban del método anterior.

El hecho de que solo se habían llevado a cabo con un 100% de éxito las probetas exclusivamente hechas con mortero y no así las que fueron realizadas con un 10% de porcentaje másico de PCM, de las cuales sólo un 25% de las pequeñas fueron extraídas con éxito así como 75% de las grandes pero con severos daños superficiales y una alta fragilidad, hace ineludible un estudio de mejora. A la vista de los resultados obtenidos en los primeros experimentos se puede deducir que estos problemas se derivan de estas dos razones principales:

- 1) El PCM es menos denso que el mortero por lo que un 10% másico se traduce volumétricamente en un valor más elevado. Lo que produce tensiones internas que pueden acabar produciendo grietas y que debido al efecto entalla, rompan las probetas, como se ha demostrado empíricamente.  
La solución a este problema pasa por conseguir una correcta presión superficial a lo largo de la probeta, que ayude al mortero a empezar a nuclear desde la superficie de las partículas de PCM. Pudiendo entonces presumiblemente añadir más porcentaje de PCM sin riesgo.
- 2) Una incorrecta cura. Para que el mortero cure de manera adecuada es necesario que conserve su humedad, siendo el porcentaje de agua clave para el aumento de las propiedades mecánicas, sin ser necesarias las mismas propiedades que se necesitan si se quisiese que trabajase como elemento estructural en un edificio, sí que tiene al menos que aguantar la extracción del molde y su posterior manipulación.  
Como se verá más adelante con el método tradicional no se puede asegurar la humedad de la probeta al 100%, por lo que será un punto clave.

#### III.2.1 El proceso desarrollado por Vijuesca

Este método se basa en rellenar un molde con mortero líquido y dejar que este cure hasta endurecerse completamente. Para la realización del molde se juntan dos partes de un tubo de PVC, el cual ha sido cortado por la mitad, por medio de cinta aislante para luego ser introducido en una peana de PE expandido (véase figura III.1) haciendo la huella con el propio tubo.

Una vez se haya solidificado el mortero se extrae el tubo de la peana de PE, se despega la cinta aislante y se extrae la probeta ya solidificada del molde. Método el cual:

- a) Requiere mucho tiempo a la hora de realizar un solo molde, además que un montaje vale solo para una sola probeta.
- b) Son necesarias dos personas para que sea llevado a cabo de manera cómoda, rápida y efectiva.
- c) Al obtenerse el molde de un tubo cortado por la mitad, siempre quedarán huecos en la zona donde se juntan las dos mitades al haberse producido pérdida de material en el corte, lo que dificulta la cura del mortero debido a la pérdida de humedad.
- d) Son necesarias varias herramientas o complementos no recuperables como son: cúter, la cinta aislante, PE expandido.
- e) El mortero al curarse se adhiere a las paredes del molde, lo que produce roturas de la probeta al abrirse, así como a la base de PE deformando así su base ó incluso llegando directamente a romperse la probeta (ver figuras III.2 y III.4).
- f) A la hora de hacer la huella con el tubo en el PE, la mayor parte de las veces se deforma y se pierde ese material (ver figura III.3).
- g) Descontrol de la longitud de la probeta, ya que no controlas cuanto introduces el tubo en la peana (ver figura III.5)
- h) Pérdida de materia prima, en especial de PCM, al extraer probetas defectuosas.



Figura III.1 Molde con Peana



Figura III.2 Base y superficie defectuosa



Figura II.3 Peana rota



Figura III.4 Probeta fracturada



*Figura III.5 Probetas con diferentes Longitudes*

### III.3 Evolución de la solución

A la vista de esta serie de desventajas se ha diseñado una solución para optimizar el proceso:

#### III.3.1 Utillaje de poliamida

En una primera instancia se decidió realizar el utillaje completo en poliamida por ser fácilmente mecanizable, la posibilidad de conseguir un buen acabado superficial y su ligereza, compuesto solo de una pieza cuyo modelo, para una probeta grande, se puede observar en las figuras III.6.

Como se puede observar consta de una peana con una pequeña ranura circular (ver detalle en figuras III.6), donde el molde iba a ir introducido para asegurar su correcto posicionamiento, de tal manera que gran parte del molde quedase introducido dentro del utillaje para asegurar una presión uniforme.

Además con simplemente añadir un poco de cera en las paredes interior y exterior del molde se facilita la extracción de la probeta. Además se consigue tapar todos los huecos que se crean en la unión de las dos partes del molde, asegurando la humedad de la probeta.

#### **Ventajas:**

Con una sola pieza se solucionan todos los problemas anteriormente descritos, haciendo posible la elaboración de probetas con una sola persona y en un tiempo muy inferior.

#### **Inconvenientes:**

Este diseño tenía varios problemas:

- 1) A la hora de ser fabricado, al ser las probetas mucho más largas que anchas (para conservar el criterio del número de Biot), si se intenta mecanizar una preforma de poliamida de 320 mm de largo en el momento que se realice el taladrado/mandrinado, para ajustar el agujero interior del utillaje, una vez se ha cilindrado o viceversa (dependería de la estrategia de mecanizado). Probablemente se deformaría la pieza debido a la fuerza de corte y a la baja resistencia de los polímeros en comparación con la de los aceros. Así mismo

se podría intentar con herramientas y máquinas especiales o cambiando a un material más resistente, lo que conllevaría un excesivo aumento del precio.

- 2) Otra desventaja de este modelo se daría a la hora de extraer el molde del utillaje, ya que inevitablemente una pequeña porción del mortero (aunque la presión sea uniforme en todo el molde gracias al utillaje), menor que con el otro método, se escaparía por la junta de unión del molde. Haciendo entonces el mortero de adhesivo entre el molde y el utillaje complicando su extracción. Añadir también que encontrar una preforma de poliamida de 120 mm de diámetro no es fácil ni barato.

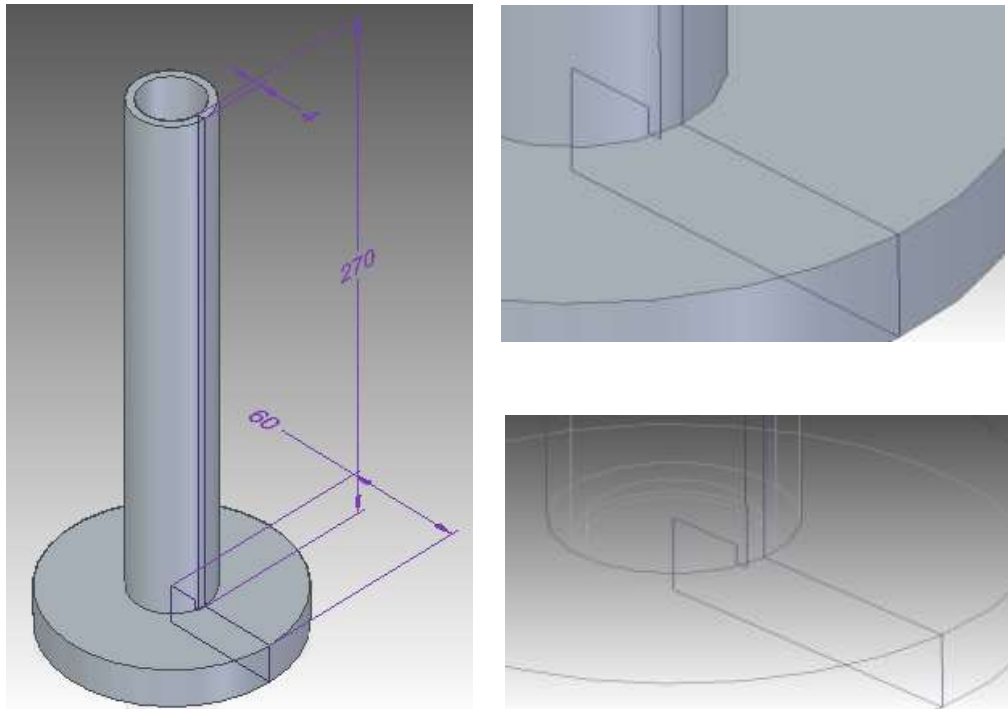


Figura III.6 Utillaje de poliamida

### III.3.2 Utillaje con tubo de aluminio y peana de poliamida

La razón por la que se llegó a esta solución fue la de evitar la deformación del tubo de poliamida a la hora de ser mecanizado, por lo que se pretendía sustituir la parte cilíndrica del utillaje por un tubo de aluminio y hacer solo la base de poliamida, como dos partes independientes de tal manera que:

- 1) Se introduciría el tubo de aluminio dentro de la peana de poliamida y por medio de algún tipo de pestaña se dejaría estas dos partes fijas entre sí.
- 2) Luego se introduciría el molde dentro del tubo de aluminio
- 3) Para finalmente echar el mortero.

De tal manera que a la hora de extraer la probeta se debería:

- 1) Separar el tubo de aluminio de la base.
- 2) Seguidamente se extraería el molde del tubo de aluminio ayudados por un martillo con el que se golpea el molde.
- 3) Para finalmente abrir el molde para sacar la probeta.

Como se puede ver aunque se soluciona el problema de la mecanización del tubo de poliamida se alarga el proceso y se añaden demasiadas piezas y herramientas. Además de la deformación que puede sufrir el molde al ser golpeado.

### III.3.3 Solución definitiva, El molde de poliamida

La solución final del problema vino cuando se decidió regresar al punto inicial de tener solo un molde, así que la solución correcta pasaba por eliminar la idea del utillaje y hacer un molde más efectivo. Para lo que se decidió directamente diseñar un molde con el negativo de las probetas (ver figura III.7), un diseño sencillo pero eficaz.

Al llevarlo a cabo se toman dos preformas de poliamida independientes, de tal manera que una sería el macho (ver figura III.8) y la otra parte la hembra (ver figura III.9). Como se puede observar se ha diseñado un saliente del macho para ajustar correctamente las partes del molde.

La forma de mantener las dos partes unidas sería mediante unas gomas dispuestas de manera longitudinal en el molde para conseguir una presión uniforme y evitar fugas (ver imagen III.10.).

La última mejora sería aplicarle cera en la pared interior semicilíndrica del molde para así extraer la probeta más fácilmente, asegurándonos de que no se adhiere el mortero a la poliamida.

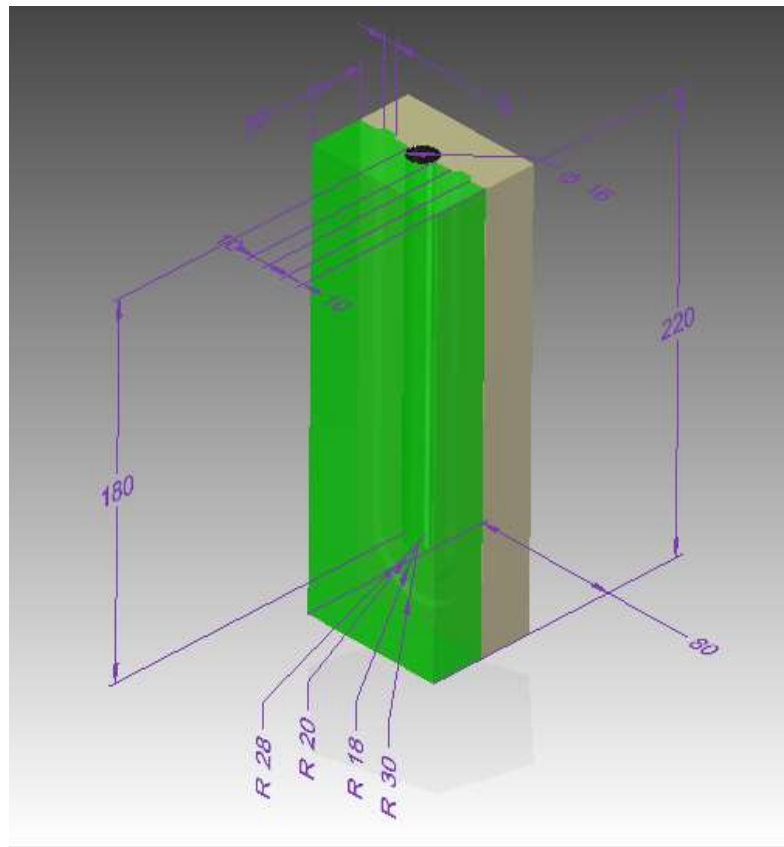
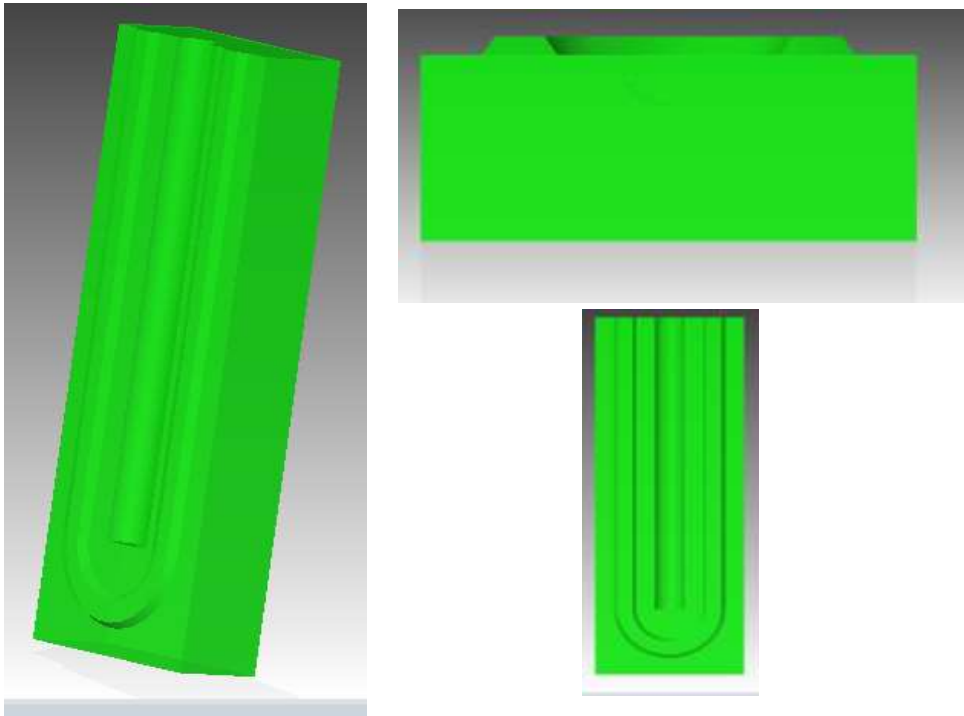
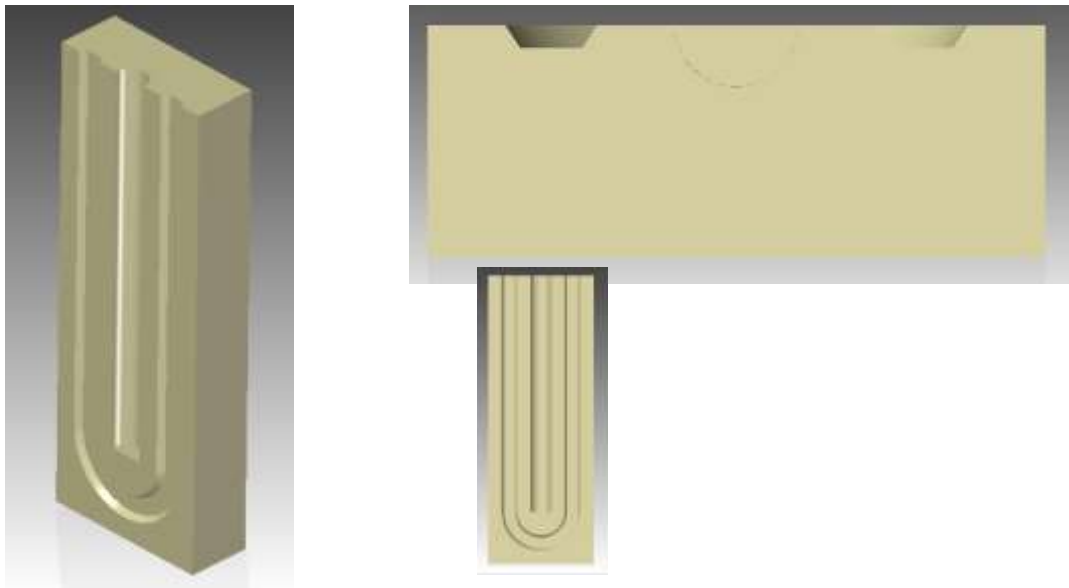


Figura III.7 Molde para probeta pequeña de poliamida



*Figura III.8 Macho del molde*



*Figura III.9 Hembra del molde*



Figura III.10 Moldes Cerrados

#### III.4 Presupuesto y Elaboración

A la vista de las necesidades se necesitaba un taller con un centro de mecanizado donde pudiese entregarse el diseño. Una vez encontrado el taller se pidió el presupuesto de materia prima suficiente como para realizar: 2 moldes para probetas grandes y 2 moldes para probetas pequeñas:



Figura III.11 Foto real molde pequeño

Pequeño clip del proceso de mecanizado de uno de los moldes:

<https://youtu.be/iPvCbmpcLYw>

### III.5 Conclusión del diseño y fabricación

El único inconveniente de éste método es que requiere de un centro de mecanizado para su elaboración además del precio de la materia prima. Son ambas desventajas iniciales no muy difíciles de solventar, que en comparación con las ventajas no justifican el descarte del método.

Las ventajas son:

- 1) No es necesario montar el molde cada vez que se quiera elaborar una probeta, lo que reduce el número de etapas y por consiguiente de tiempo.
- 2) Con una persona se puede realizar el proceso cómodamente.
- 3) Al ser dos partes independientes de poliamida, correctamente mecanizadas las que forman el molde, los resquicios que se forman entre las superficies de unión son prácticamente indetectables, lo que asegura una buena humedad en la probeta de mortero y por tanto una buena cura.
- 4) No son necesarias ningún tipo de herramientas complementarias
- 5) Gracias a la cera el mortero no se adhiere a la poliamida lo que aumenta la calidad superficial y disminuye el riesgo de rotura en su extracción.
- 6) Al formar la base parte del molde, se elimina el uso de PE expandido, además de poder controlar de manera mucho más efectiva la longitud de las probetas.
- 7) Se asegura una presión uniformemente repartida en toda la probeta, lo que aumentará considerablemente el porcentaje de éxito.

En definitiva este método aumenta de manera notable la probabilidad de éxito y la facilidad a la hora de llevarse a cabo, disminuyendo de manera apreciable el tiempo de elaboración.

### III.6 Primer intento de fabricación de las probetas y conclusiones

Utilizando una dosificación de 350 Kg de cemento/ m<sup>3</sup> de probeta y

$$\text{Kg de agua} = 0.8 \cdot \text{Kg de cemento}$$

se llevó a cabo el primer intento de fabricación de las probetas con los nuevos moldes.

En los moldes de las probetas pequeñas se le añade una fina capa de cera para ver si así se evita que el mortero se adhiera al molde, no así en las probetas grandes para poder comparar si realmente es útil.

#### Conclusión:

Tras dejar madurar el mortero durante 48 horas tal y como establece la norma [10], se abren los moldes (ver figura III.12), las probetas pequeñas con un 25% en masa de PCM se extrajeron del molde sin ningún tipo de problema (hecho que hasta el momento no se había conseguido), en cambio las probetas grandes se adhirieron al molde de tal manera que tras las 48h eran imposibles de extraer.



Se puede concluir entonces que el uso de esta dosificación es la forma correcta de componer las probetas de mortero para el ensayo que se realiza en este proyecto. Además es indispensable añadir una capa de cera para así facilitar la extracción.



*Figura III.12 Proceso de desmoldeo*

## Anexo IV. Plantilla de Ensayo

Ensayo nº \_\_\_\_\_

|                                     |                  |                  |                    |
|-------------------------------------|------------------|------------------|--------------------|
| Datos del ensayo:                   |                  |                  |                    |
| Fecha:                              |                  |                  |                    |
| Proceso:                            | Fusión__         | Solidificación__ |                    |
| Sustancia (Mortero + % y tipo PCM): | %PCM__           | Tipo__           | Masa Total (g)__   |
| Material de referencia:             |                  |                  |                    |
| Número y posición de sensores:      | Nº__             | Izquierda__      | Derecha__ Centro__ |
| Tamaño probetas:                    | Diámetro (mm):__ |                  | Longitud (mm):__   |
| $\Delta$ Tiempo (min):              | Calentamiento:__ |                  | Enfriamiento:__    |
| Rango de Temperatura (°C):          |                  |                  |                    |

|  |
|--|
| Objetivos:                               |
| <br><br><br><br><br><br><br><br><br><br> |

|  |
|--|
| Definición del Ensayo:                   |
| <br><br><br><br><br><br><br><br><br><br> |

|  |
|--|
| Observaciones y Anomalías:               |
| <br><br><br><br><br><br><br><br><br><br> |

## Anexo V. Instrumentación

### Horno:

Con ayuda del horno se puede calentar las probetas hasta la temperatura requerida. Gracias a una sencilla interfaz se ve la temperatura a la que se encuentra el horno y activar o desactivar el ventilador del mismo, con lo que se puede asegurar la convección natural (ventilador apagado) o se puede encenderlo para acelerar el proceso de calentamiento. [25]



Figura V.1 Horno e interfaz

### Nevera con resistencias incorporadas:

La nevera de la que se dispone permite enfriar hasta un mínimo de unos 5°C más que suficiente para llevar a cabo los ensayos. Además dispone de un controlador PID que permite controlar la temperatura ambiente de la nevera con el que se puede regular por tanto la velocidad de calentamiento o enfriamiento. También dispone de una serie de resistencia que permiten calentar el ambiente si hiciese falta. [25]



Figura V.2 Nevera, interfaz y tarjeta

### Sondas de superficies Pt-100:

Permiten medir la temperatura superficial en un punto, son sensores de temperatura de tal manera que ha 0°C se tiene 100 ohmios y conforme se va aumentando la temperatura se aumenta también la resistencia es decir son termómetros de resistencia.

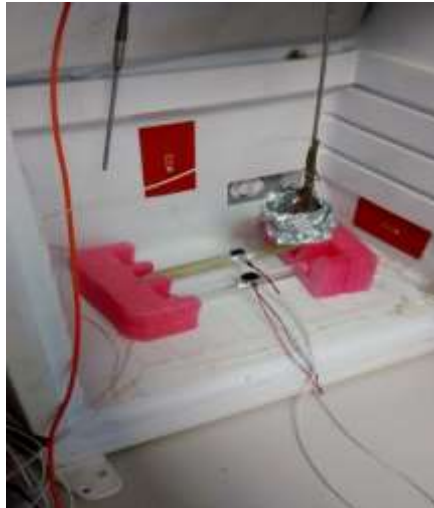
Si se realiza correctamente el contacto térmico:

Se añade la cola de contacto térmico, se adhiere la sonda, se coloca justo sobre ésta un aislante y se asegura todo con cinta aislante. De esta manera se consigue el mejor contacto con la mínima perturbación en la medición, debida tanto a la variación de la emisividad en el punto como la debida a la temperatura ambiente sin dejar de ser una medición superficial.

Por último es importante recalcar que en el trabajo de Vijuesca [1] se puede ver en detalle el estudio que realizó para la selección y fabricación de estas sondas y su incertidumbre tras la realización de varios ensayos.

#### Sistema de adquisición de datos:

Para la realización de este trabajo se dispone de una tarjeta que interpretará la variación de tensión que llega a la misma en función del valor de la resistencia que ofrece la sonda pt-100, para luego registrarlo en un ordenador con ayuda del programa sistema "Agilent Technologies". [25]



*Figura V.3 Probetas con sondas, sonda ambiente, y sonda PID (naranja)*

#### Cámara Termográfica FLIR EXX series:

Esta cámara son permitirá fotografiar térmicamente el cuerpo de la probeta en todas las fases del ensayo lo que permitirá ver los gradientes de temperatura dentro de la probeta y comprobar la homogeneidad de ésta.



*Figura V.4 Cámara termográfica FLIR EXX series*

## Anexo VI. Tratamiento de datos

Una vez terminado el ensayo se tienen almacenados en una hoja Excel los valores obtenidos por las sondas, de tal forma que se podrían generar las tablas T-t de los puntos de medida (ver figura VI.1):

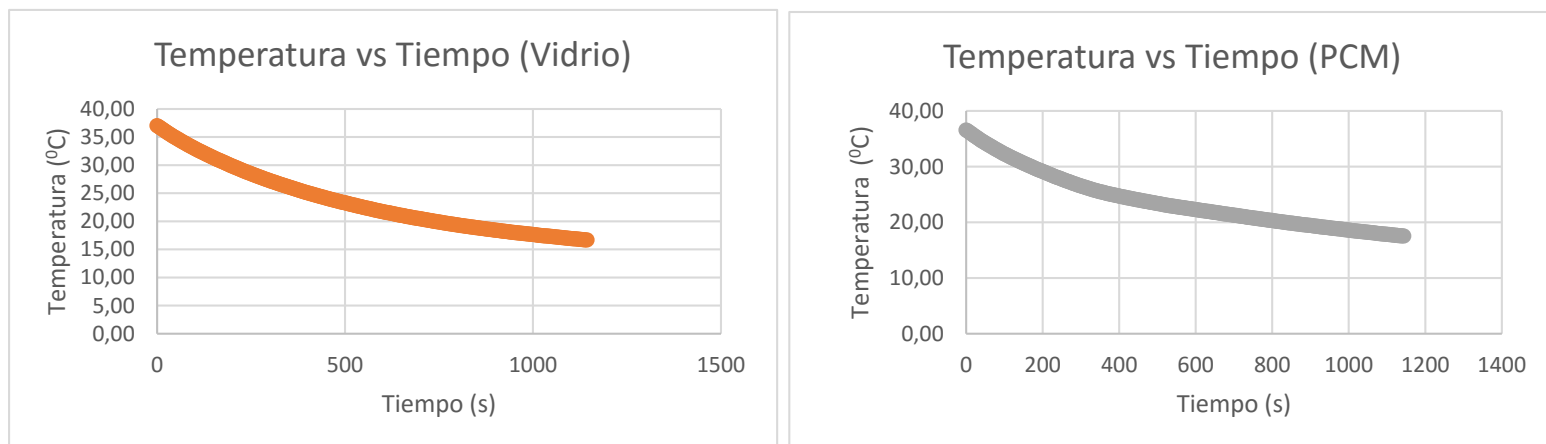


Figura VI.1 Ejemplo de tablas de Temperatura vs tiempo

Para conseguir las curvas h-T se debe tratar estos datos aplicando adecuadamente las ecuaciones comentadas en el punto 2:

- 1) Se calcula el área encerrada bajo la curva T-t hasta la temperatura ambiente tanto para la probeta como para la referencia.

$$dA = (T - T_{amb})dt \xrightarrow{\text{Integramos}} A = (\bar{T} - \bar{T}_{amb})(t - t_0) \quad (\text{ec. VI.1})$$

Se va sumando el área calculada para cada intervalo ( $\bar{T}$ ) y se va sumando al valor anterior ( $T_0$ ) de tal manera que al final se tendrá el valor total del área:

$$A_t = A + A_0 \quad (\text{ec. VI.2})$$

- 2) Se calcula la temperatura media de la integral para el vidrio y para el PCM:

$$\bar{T}_{int} = \frac{A_t}{t-t_i} + \frac{(\bar{T}_{amb}-T_{amb_i})}{2} \quad (\text{ec. VI.3})$$

Con  $T_{amb_i}$  y  $t_i$  el valor inicial de la temperatura ambiente y el tiempo respectivamente.

- 3) A continuación se fija un paso de integración  $\Delta T_{int}$ . Se elige la temperatura inicial (tiene que estar dentro del rango de temperaturas utilizado en el ensayo) y se interpola el valor de  $A_t$  para las nuevas temperaturas tanto de la probeta como de la referencia y el valor de la temperatura ambiente.
- 4) El siguiente paso consiste en ir calculando los incrementos de entalpía con la ecuación 2.11, aplicada al caso estudiado:

$$\Delta h_{prob} = \frac{m_v c_{pv} \Delta T_{int} (A_{interpol}^{prob} - A_{interpolo}^{prob})}{(A_{interpol}^{vid} - A_{interpolo}^{vid}) m_{prob}} \quad (\text{ec. VI.4})$$

Las masas de la varilla de vidrio  $m_v$  y de la probeta  $m_{prob}$  se conocen, ya que se tiene la posibilidad de pesarlas. El calor específico del vidrio  $c_{pv}$  se sabe para cada temperatura gracias al trabajo de M<sup>a</sup> Concepción Peñalosa, que aplicó el método DSC para obtenerlo.

- 5) Finalmente para el cálculo de la curva h-t solo hace falta tomar una entalpía de origen e ir sumando los diferentes saltos de entalpía, quedando una curva semejante a esta:

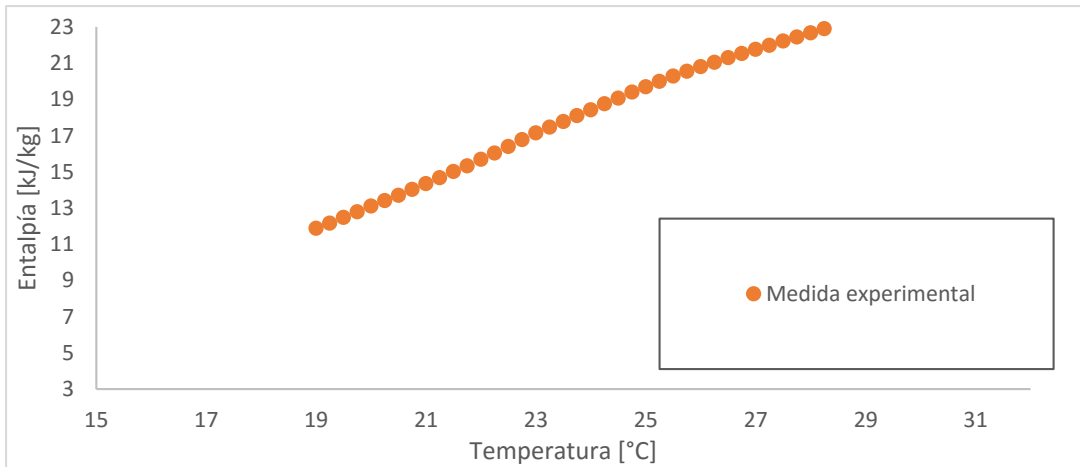


Figura VI.2 Curva ejemplo experimental h-T de una probeta con un 10% de PCM

- 6) Por último queda calcular la curva  $c_p$ -T para lo que se utiliza:

$$c_{pprob} = \frac{m_v c_{pv} (A_{interpol}^{prob} - A_{interpolo}^{prob})}{m_{prob} (A_{interpol}^{vid} - A_{interpolo}^{vid})} \quad (\text{ec. VI.5})$$

Quedando una curva semejante a esta:

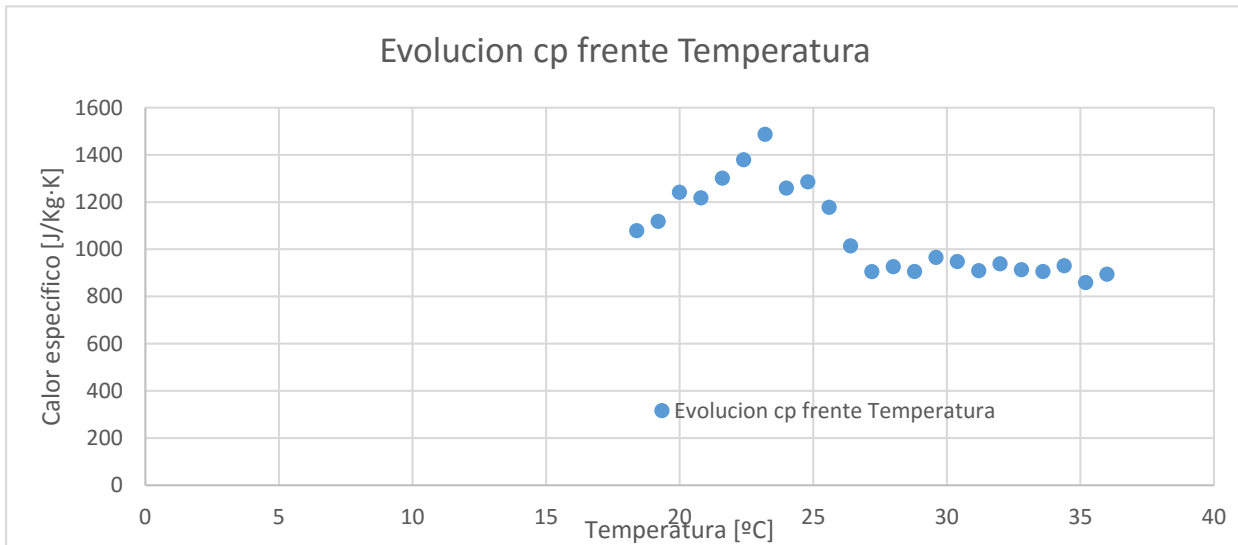


Figura VI.3 Curva ejemplo experimental  $c_p$ -T de una probeta con un 10% de PCM

## Anexo VII. Ensayos realizados

### VII.1 Ensayos T-history

#### VII.1.1 Ensayo 0 (Observar la reproducibilidad del ensayo)

##### Objetivo:

Comprobar la reproducibilidad del ensayo ideado y realizado por Vijuesca [1], además servirá para familiarizarse con la instrumentación y la metodología.

##### Realización:

- 1) Con las probetas (mortero más PCM y vidrio) correctamente sondadas, se calientan hasta 40°C en el horno mientras se estabiliza la temperatura de la nevera a 10°C).
- 2) Cuando tanto las probetas como la nevera se estabilicen, se extraen del horno las probetas y se introducen en la nevera. Mientras se van enfriando se almacena toda la información gracias al sistema de adquisición de datos. Se espera a que la temperatura de las probetas y de la nevera se iguale.

Se tratan los datos como se explica en el anexo VI. Se obtiene:

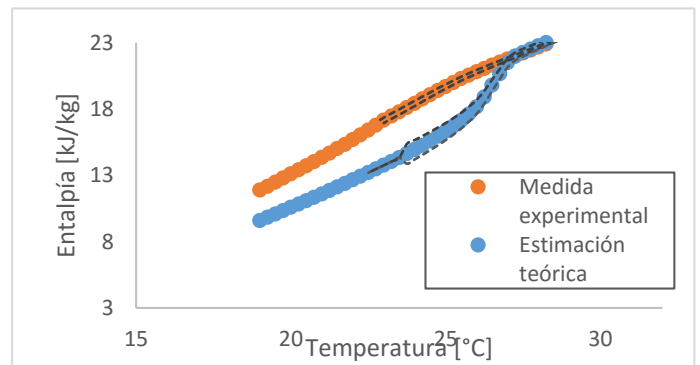
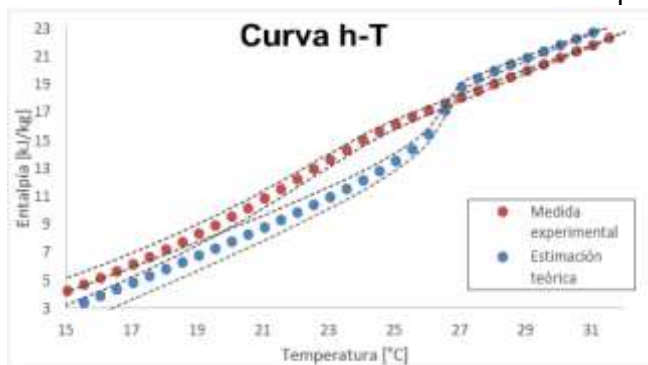


Figura VII.1 Evolución de  $h$  en función de la temperatura, izq Vijuesca dcha nuevo ensayo

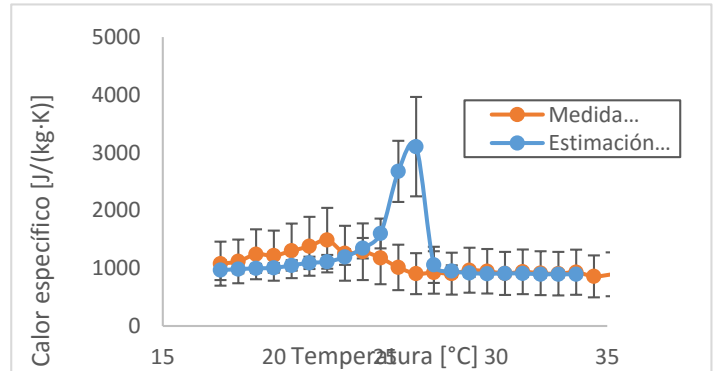
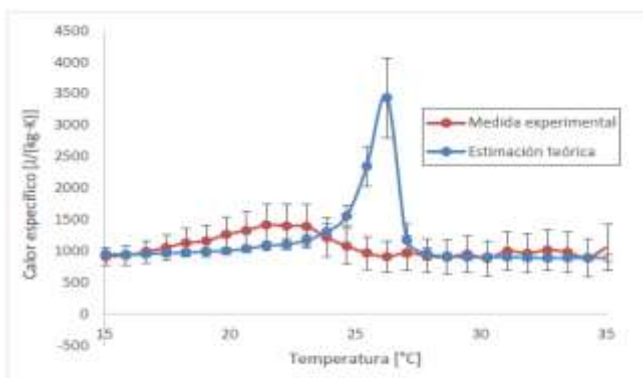


Figura VII.2 Evolución de  $c_p$  en función de la temperatura, izq Vijuesca dcha nuevo ensayo

##### Conclusiones

A la vista de los resultados obtenidos se puede decir que el método sí podría ser reproducible.

## VII.1.2 Ensayo 1 (Ver efecto al aumenta la fracción másica de PCM por probeta)

### Objetivo:

Ver el efecto al aumentarse el % de PCM en peso, se espera un aumento de la capacidad de almacenamiento de energía térmica en la probeta. Y ver el error comparando la curva obtenida con la teórica.

### Realización:

#### 1) Enfriamiento (Solidificación):

Las probetas (mortero más PCM y vidrio) correctamente sondadas, son calentadas hasta 40 °C en el horno mientras se estabiliza la temperatura de la nevera a 10 °C. Cuando las probetas y la nevera se estabilicen se extraen del horno las probetas y se introducen en la nevera, durante el proceso de enfriamiento se va registrando la evolución temporal de la temperatura. Se espera a que la temperatura de las probetas y de la nevera se iguale.

#### 2) Calentamiento (Fusión):

Como ya se tienen las probetas a 10°C solo se debe tener en cuenta que el horno quede estabilizado a 40°C y se reintroducen las probetas en el horno y de nuevo se registra esa variación de temperatura.

### Observaciones y anomalías:

- 1) Mucha dificultad para mantener la sonda bien colocada.
- 2) Rotura de la probeta al colocarle la sonda, al ejercer una fuerza superior a la resistida por la probeta.

### Conclusiones:

Si se observa la figura VII.3 donde se puede ver la evolución de la entalpía en función de la temperatura para la instalación y montaje con un 25% de PCM en masa por probeta. Se puede observar que están fuera del error máximo marcado en la Tesis de Javier Mazo [4]. Luego se tendrá que buscar las posibles fuentes de error e intentar solventarlas. Por otro lado el aumento del porcentaje del PCM en peso favorece el efecto de conservación de la energía térmica.

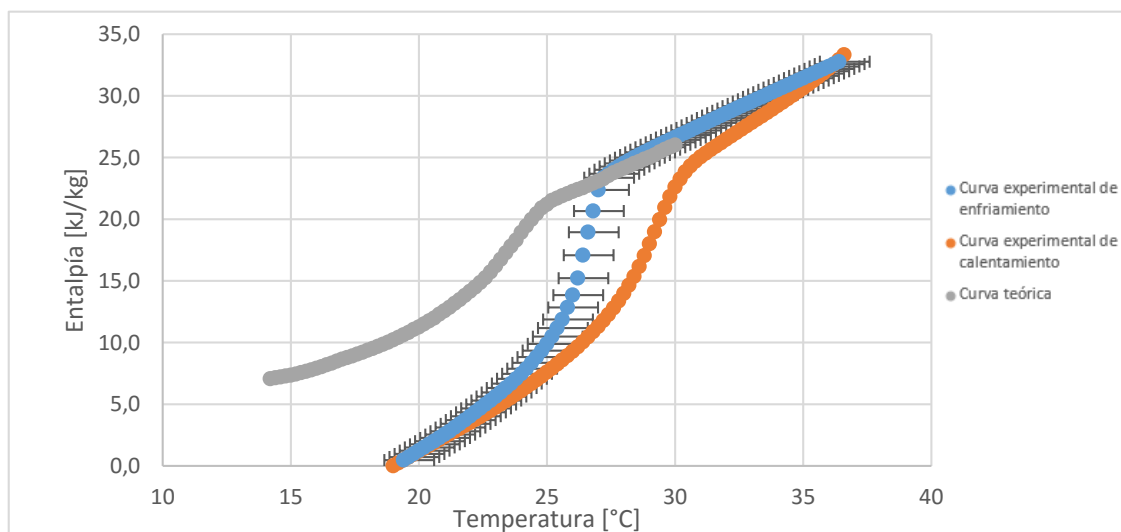


Figura VII.3 Evolución de la entalpía en función de la temperatura para la instalación descrita y montaje con un 25% de PCM en masa por probeta.



### VII.1.3 Ensayos 2, 3, 4 y 5(Observar los gradientes de temperatura)

#### Objetivos:

Ver los gradientes de temperatura de la probeta que se dan por la falta de homogeneidad de la probeta.

#### Realización:

Para ver estos gradientes de temperatura se colocaron varias sondas en la probeta de PCM, se realizó el mismo proceso de enfriamiento que en el ensayo 1 y se almacenó la variación de temperatura en cada uno de los puntos de la probeta.

Para realizar este ensayo de manera efectiva hicieron falta varios intentos hasta que se consiguió la forma correcta de llevarse a cabo:

#### → **Ensayo 2:**

En la foto de la izquierda de la figura VII.4 se puede ver el primer montaje, donde no se asegura la posición de las probetas salvo por el adhesivo del propio aislante, lo que hacía que las sondas se soltarán con facilidad cuando eran manipuladas.

#### → **Ensayo 3:**

Para solucionar este problema se ha optado por adherir los cables a la probeta, lo que ha facilitado enormemente la realización del ensayo pudiéndose añadir un total de 5 sondas ver figura VII.4 derecha.



Figura VII.4 Montaje de varias sondas, izquierda ensayo 2; derecha ensayo 3

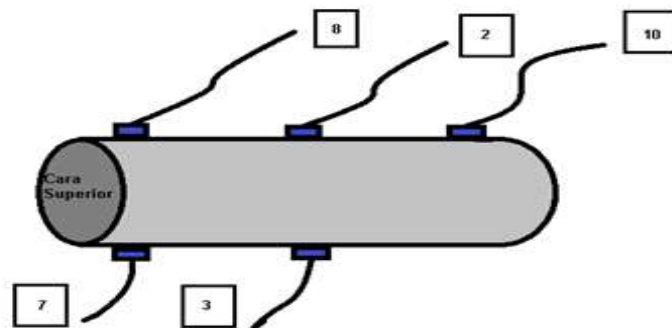


Figura VII.5 Esquema de las sondas para el ensayo 3

**Conclusión:**

Observando las gráficas T-t (figura VII.6) obtenidas del ensayo 3 se puede observar como los extremos tienen evoluciones temporales de la temperatura distintas, siendo especialmente notables en el extremo derecho, cuya caída de temperatura es mucho más pronunciada. Lo que puede llevar a pensar que la probeta sí tiene gradientes de temperatura longitudinales o locales por lo que desmontaría toda la base teórica del ensayo.

Igualmente se puede deducir que en el eje  $\theta$  no se da esta diferencia tan pronunciada por lo que se ha quitado la sonda 10 y se ha sustituido por la 7, así es posible asegurar si esta desviación de la evolución temporal de la temperatura en la cara inferior, es debido en realidad a un error de medida de la sonda 10.

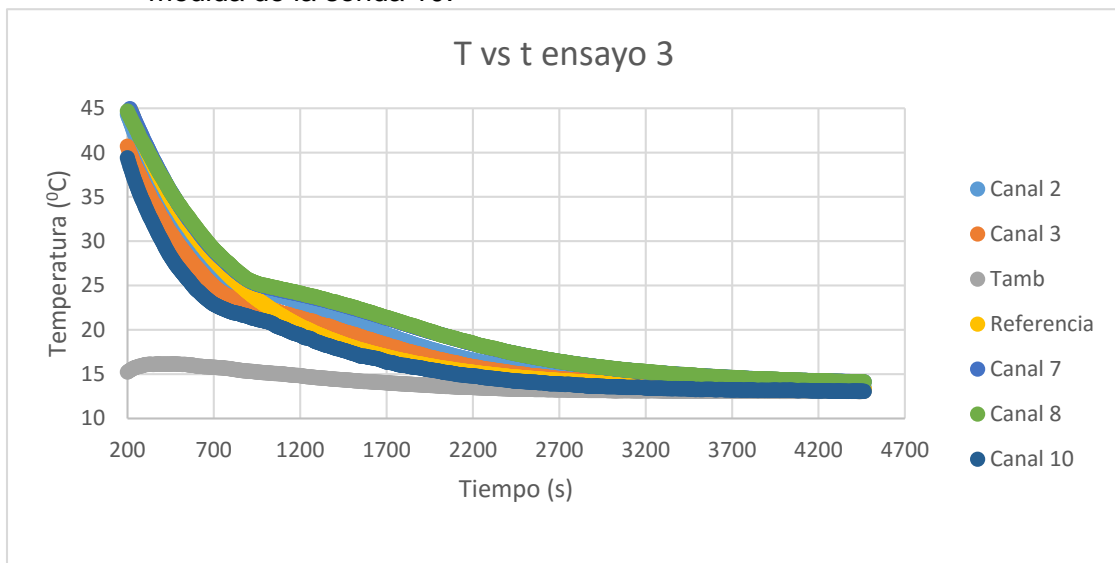


Figura VII.6 Resultados ensayo 2

**→ Ensayo 4:**

Para intentar suprimir todo error que pudiese afectar a las sondas de los extremos de la probeta se elaboró un soporte ver figura VII.7 que evitase un excesivo contacto de los extremos de las probetas con el montaje de apoyo y se repitió el experimento (ensayo 3).



Figura VII.7 Utilaje final ensayo

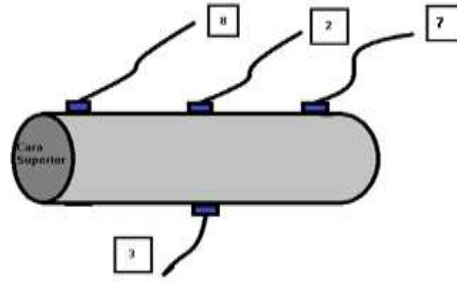


Figura VII.8 Esquema de las sondas para el ensayo 4, 5 y 6

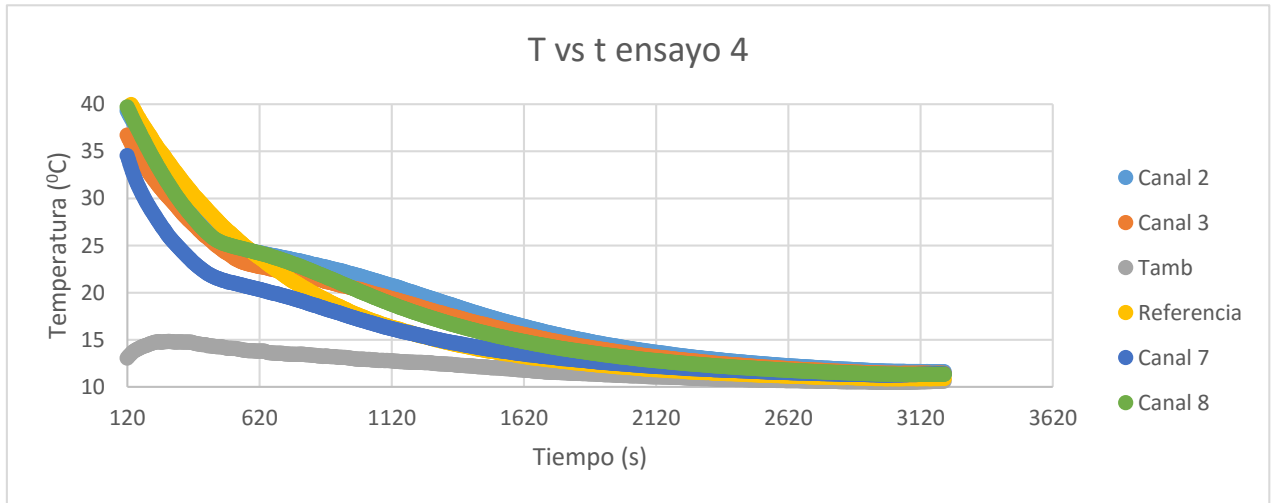


Figura VII.9 Resultados ensayo 3

**Conclusión:**

Si se atiende los resultados obtenidos para este ensayo (ver figura VII.9) se puede ver como este nuevo montaje aunque reduce el error, no es lo suficientemente efectivo.

➔ **Ensayo 5:**

El siguiente paso siguiendo la senda de intentar eliminar los efectos del ambiente fue colocar un doble aislamiento en cada uno de los puntos de medida lo que hace que el coeficiente de transferencia de calor global para cada sonda se vea reducido, de tal manera que la sonda prácticamente solo capte la variación de la temperatura en las probetas.

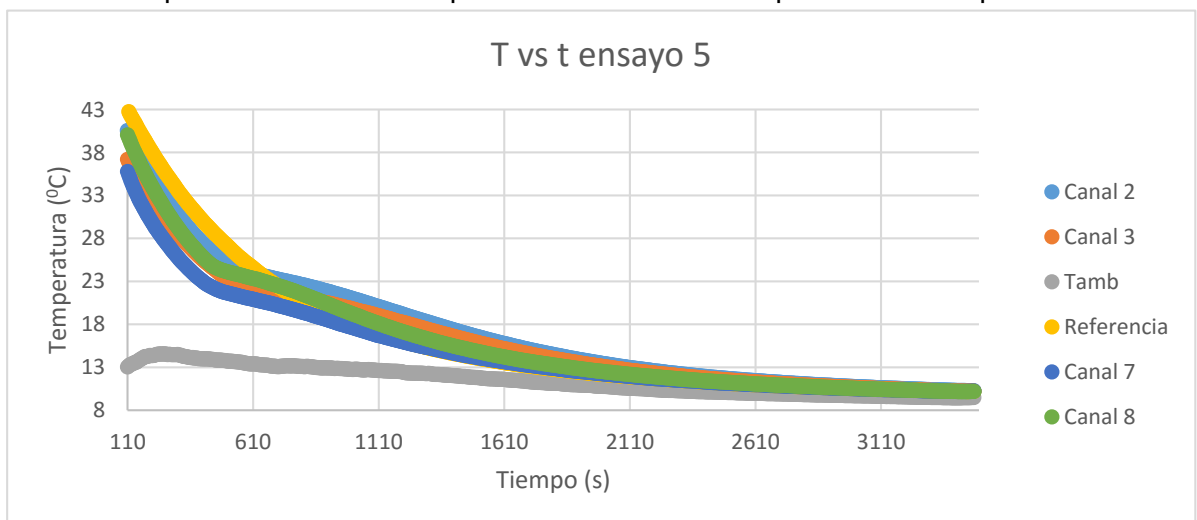


Figura VII.10 Resultados ensayo 5

**Conclusión:**

Observando los resultados (ver figura VII.10) aparentemente parece que los gradientes de temperatura no son tan elevados como los obtenidos en el ensayo 2. Aun así queda patente en estos ensayos que existen gradientes de temperatura dentro de la probeta. Para asegurarse se ha realizado un ensayo fotografiando el proceso con una cámara termográfica, que permitirá visualizar si estos gradientes realmente existen.

→ **Ensayo 6:**

Para concluir este conjunto de ensayos se utilizó otra probeta de 25% de PCM y se repitió el ensayo aplicándole todas las mejoras hasta ahora llevadas a cabo.

**Conclusión:**

Sigue existiendo cierta variabilidad que sigue indicando que existen gradientes de temperatura aun así sigue siendo necesario el uso de la cámara termográfica para verificar la existencia de estos gradientes. Otra conclusión es que las curvas obtenidas para las dos probetas son bastante semejantes por lo que el método es realmente efectivo entre probetas.

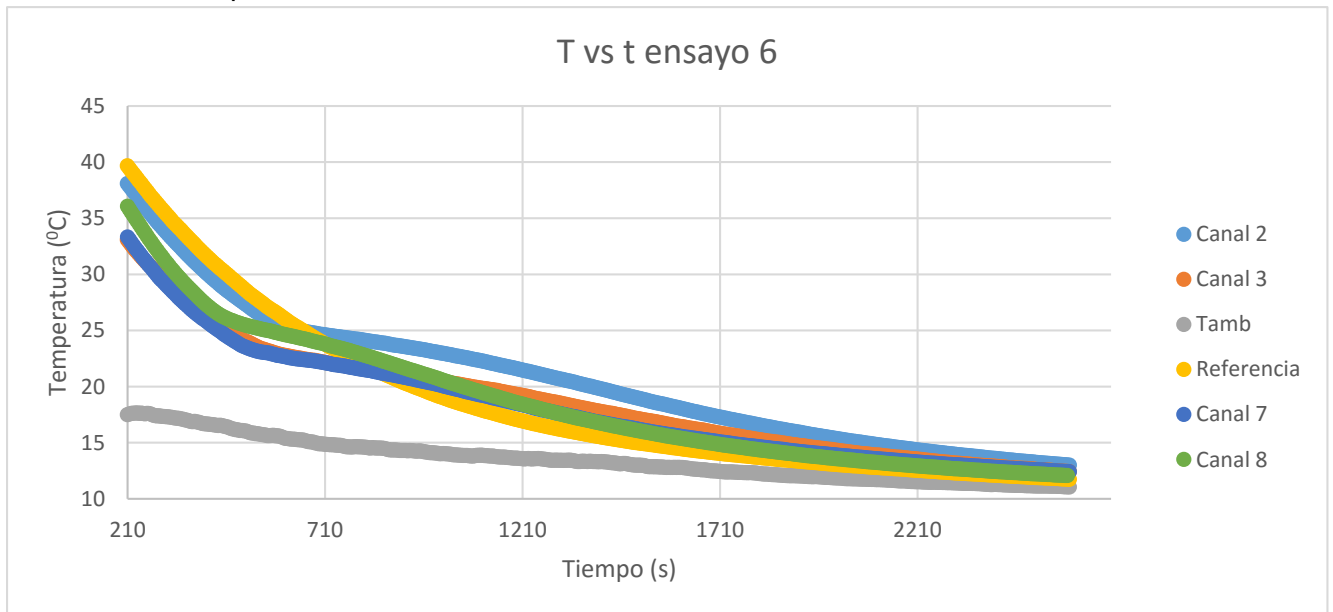


Figura VII.11 Resultados ensayo 6

→ **Conclusiones generales:**

Como conclusión general se puede extraer que existe cierta desviación de la temperatura entre diferentes puntos de la probeta, estas desviaciones se hacen más notables en el cambio de fase y se van disipando conforme se llega a la estabilidad del sistema. Con todas las mejoras que se han ido haciendo al ensayo estas desviaciones han ido disminuyendo aunque no lo suficiente siendo de alrededor de 2-3°C las desviaciones durante el cambio de fase.

Igualmente se puede ver como esta desviación es debida en parte a la segregación del PCM en la matriz del mortero durante su fase de moldeo y fraguado, ya que si se atiende al canal 7 el cual mide la temperatura de la que fue la cara inferior de la probeta durante la maduración y el proceso de moldeo de las probetas, en este extremo la variación de temperatura es

mucho más rápida que en cualquier otro punto sondado de la probeta con PCM.

#### VII.1.4 Ensayo 7 (Observar los gradientes con la cámara termográfica)

##### Objetivos:

Observar los gradientes de temperatura dentro de la probeta para comprobar que la probeta cambia de temperatura de manera semejante en todos sus puntos para así poder afirmar que el uso del modelo de sustancia homogénea es correcto.

##### Realización:

- 1) Se sonda en los extremos y en centro de la probeta para ir controlando la temperatura.
- 2) Se cubre la probeta con cinta aislante de color negro (ver figura VII.12) y se calibra la cámara cambiando la emisividad hasta que el valor dado por la cámara sea igual al leído por las sondas.
- 3) Se calienta la probeta y se espera hasta que las tres sondas den la misma temperatura.
- 4) Se introduce la probeta en la nevera y se va fotografiando periódicamente la probeta.



Figura VII.12 Montaje ensayo 7

#### VII.1.5 Ensayo 8 (Aislamiento total de las probetas)

##### Objetivos:

Tras haber observado el efecto borde gracias a la cámara termográfica se ha decidido aislar las probetas con cinta de espuma negra (caucho celular) con el fin de reducir los gradientes de temperatura dentro de la probeta aumentando el tiempo hasta que se estabilice reduciendo así la formación de estos gradientes de temperatura. Además al aislar como se ha visto en el punto 3 disminuye el coeficiente de transferencia de calor por lo que se reduce el número de Biot, lo que conlleva una disminución del error.

##### Realización:

- 1) Se cubre las probetas con la cinta de aislante térmico (ver figura VII.14).
- 2) Se realiza el mismo procedimiento de calentamiento-enfriamiento que en los ensayos anteriores.

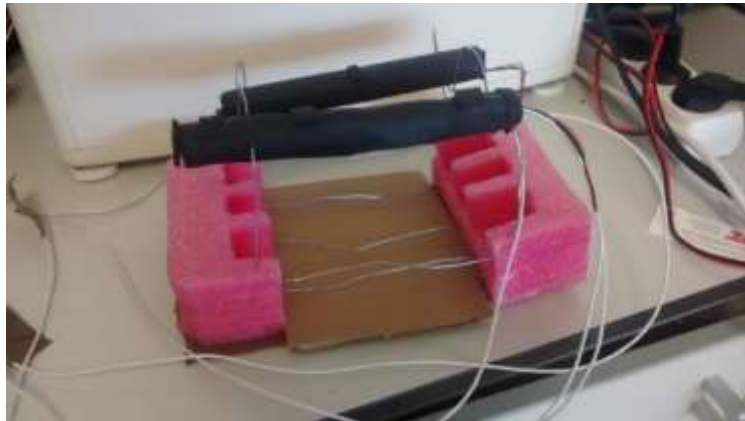


Figura VII.14 Probetas aisladas

Resultados:

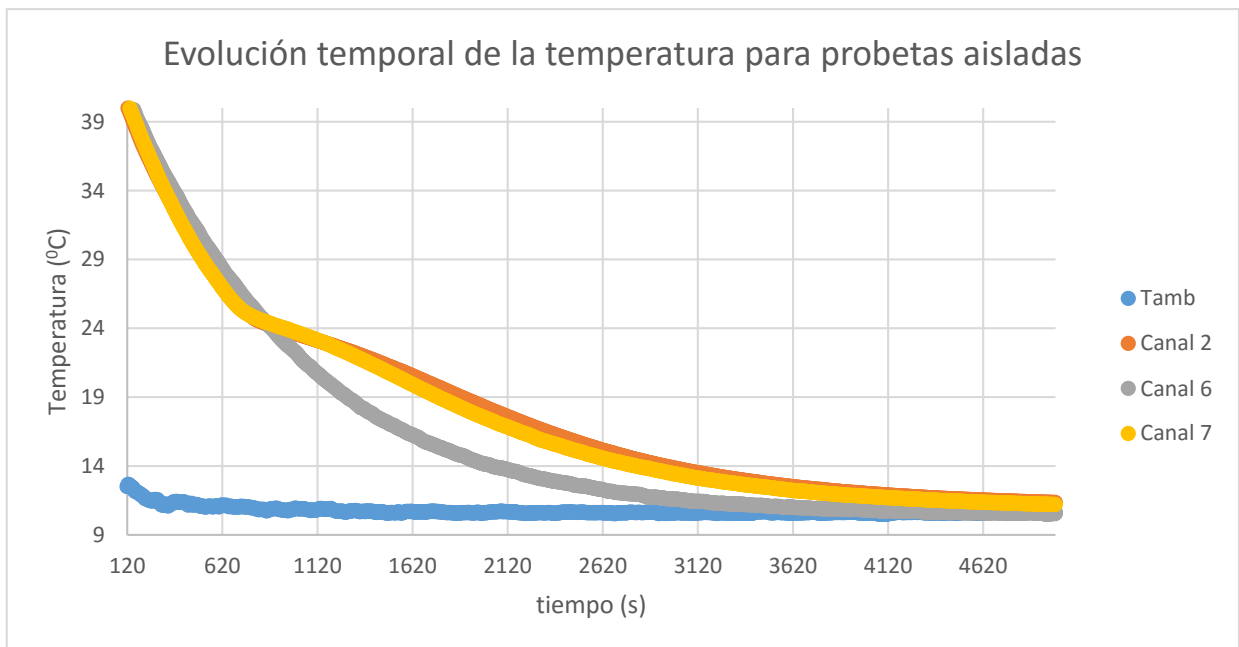


Figura VII.15 Resultados para probetas aisladas

Conclusión:

A la vista de los resultados los gradientes de temperatura han sido prácticamente eliminados, por lo que se puede concluir que para este ensayo aislar las probetas con cinta de caucho celular es un buen método para suprimir estos gradientes.

## VII.1.6 Tabla resumen de los ensayos

| Nº Ensayos | Referencia | Tamaño  | Nº sondas | %PCM | Objetivos  | Mejora  | Conclusiones   | Observación/Anomalías                                |
|------------|------------|---------|-----------|------|--|---|--|--|
| 0          | vidrio     | Pequeña | 1         | 10   | Observar la reproducibilidad del ensayo  |   | Método reproducible  |  |
| 1          | vidrio     | Pequeña | 1         | 25   | Ver el efecto al aumenta la fracción másica de PCM por probeta                                 | Mayor % PCM   | Mejor conservación de la E. Térmica/Grandes errores respecto a la curva teórica  | Rotura de la probeta durante la manipulación         |
| 2          | vidrio     | Pequeña | 3         | 25   | Observar los gradientes de temperatura   | 3 sondas colocadas longitudinalmente  |  | Dificultad a la hora de asegurar el contacto térmico |
| 3          | vidrio     | Pequeña | 5         | 25   | Asegurar contacto térmico  | 5 sondas colocadas a diferentes z y $\theta$ adheridas con cinta a la probeta | Las sondas quedan aseguradas a la probeta correctamente/<br>aparición de gradientes de temperatura en z                      |  |
| 4          | vidrio     | Pequeña | 4         | 25   | Evitar el efecto de pequeños cambios del coeficiente convección debidos al soporte             | Modificar el soporte elevando las probetas                                    | Cierta mejora en los resultados, aun así se siguen apreciando gradientes   |  |
| 5          | vidrio     | Pequeña | 5         | 25   | Evitar el error debido al efecto del ambiente en las sondas                                    | Poner doble aislamiento en los puntos de medida                               | Cierta mejora en los resultados, aun así se siguen apreciando gradientes   |  |
| 6          | vidrio     | Pequeña | 5         | 25   | Comprobar si el error es debido a la probeta   | Cambiar de probeta  | Siguen apareciendo gradientes de temperatura   |  |
| 7          |            | Pequeña | 3         | 25   | Ver gradientes de temperatura en z, $\theta$ y puntuales                                       | Usar cámara termográfica  | Visualización de gradientes de temperatura en z (efecto borde)   |  |
| 8          | Vidrio     | Pequeña | 5         | 25   | Disminuir el error debido a la creación de gradiente y a la velocidad de cambio de temperatura | Asilar las probetas con caucho celular  | El efecto borde se ve claramente mermado/Temperatura y entalpía de cambio de fase empírica todavía dista mucho de la teórica |  |

## VII.2 Otros ensayos

### VII.2.1 Ensayo de obtención el tiempo de respuesta de las sondas

#### Objetivo

Obtener el tiempo de respuesta de las sondas (de elemento de Platino RTD, serie F2020 [24] más el cable Pt 100 de extensión de RTD de la empresa Omega Engineering Limited) para así ser capaces de calcular el error debido a esta variable.

#### Realización

Se calienta una probeta sondada a 40°C en el horno mientras se estabiliza otra sonda a temperatura ambiente 25°C. Cuando se tengan ambas estabilizadas se abre el horno y se pega la sonda a 25°C en la probeta y se ve cuánto tarda en estabilizarse. Se repite este proceso 3 veces obteniendo:

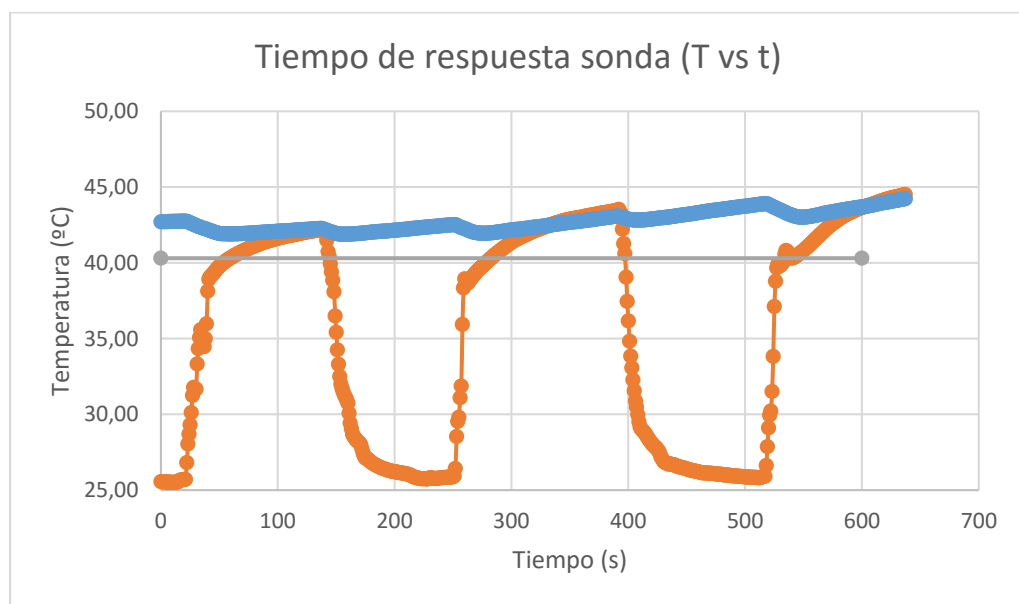


Figura VII.16 Tiempo de respuesta de las sondas

Se pueden observar dos dinámicas, la primera es el calentamiento de la sonda y probablemente la segunda es debida a las diferentes capas de aislamiento que tiene la sonda, luego se podría despreciar.

Para ajustar más el resultado se ha estudiado cada curva de calentamiento de forma independiente:

- 1) Se ha visto la temperatura y el momento cuando la curva empieza a crecer y la temperatura máxima a la que puede llegar definida por la línea azul (temperatura de la probeta).
- 2) Se ha visto cuánto tarda la probeta introducida en llegar al 60 y al 90 por ciento de la temperatura máxima (marcada por la línea azul).

Calculando cuantas veces la constante tiempo,  $\tau$ , son necesarias para llegar al el 60 y el 90 por ciento de la curva y teniendo los incrementos de tiempo se puede calcular a partir de la pendiente la contante de tiempo tau.



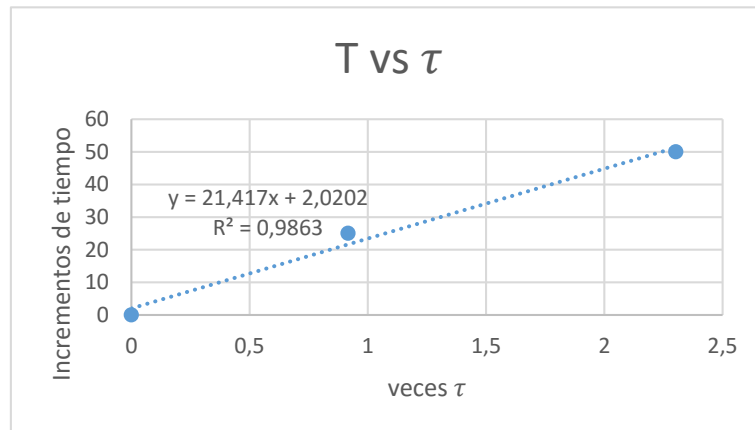
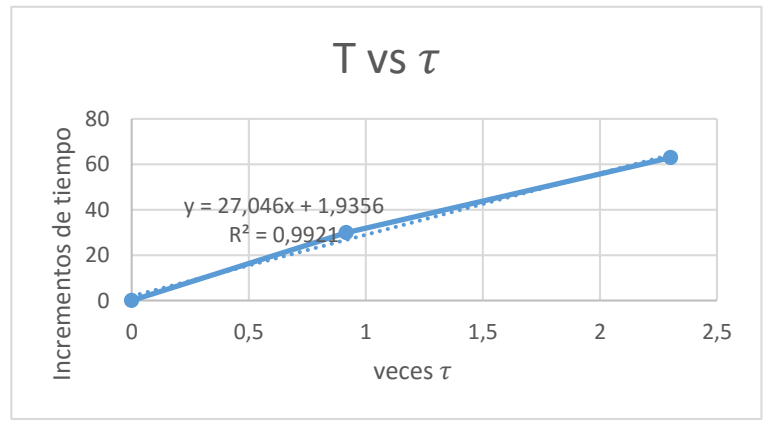
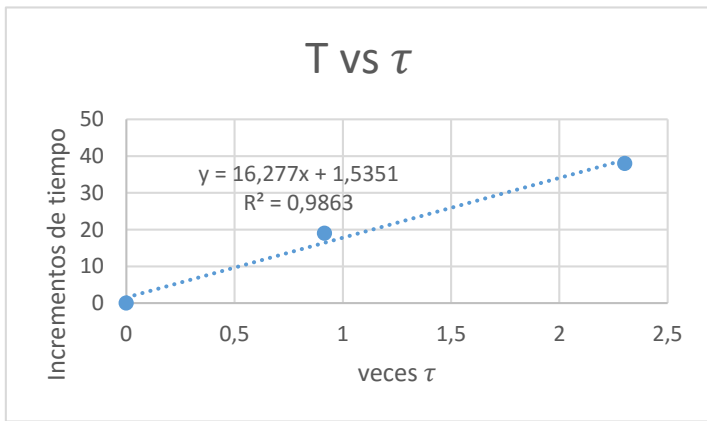


Figura VII.17 T vs  $\tau$

Y sabiendo que:

$$t_r = 3 \cdot \tau$$

Se realiza una media de las tres pendientes y sale como resultado final

$t_r = 65s$ .

## Anexo VIII. Análisis multidimensional producto

Se ha realizado el estudio multidimensional producto para la probeta cilíndrica ensayada (longitud,  $L = 180 \text{ mm}$  y diámetro  $D = 16 \text{ mm}$ ), con el fin de estudiar teóricamente los gradientes de temperatura en el cuerpo de la probeta.

Para este cometido se ha supuesto un problema transitorio donde existe más de una dirección espacial (concretamente  $2 \times r$  y  $x$ , convirtiéndose en un problema 2D) la geometría del sistema se puede construir con la intersección de dos geometrías unidimensionales (pared plana infinita (pp), cilindro infinito (cil)), la solución se puede obtener como producto de las soluciones de estos dos casos unidimensionales:

$$\theta^* = \frac{\theta}{\theta_i} = \frac{T_{sol} - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} \quad \text{ec. VIII.1}$$

$$\frac{\theta(r,x,t)}{\theta_i} = \left(\frac{\theta(r,t)}{\theta_i}\right)_{cil} \cdot \left(\frac{\theta(x,t)}{\theta_i}\right)_{pp} \quad \text{ec. VIII.2}$$

$$\theta^* = \theta_{cil}^* \cdot \theta_{pp}^* \quad \text{ec. VIII.3}$$

$$\frac{T_{sol}(r,x,t) - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} = \frac{T_{cil}(r,t) - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} * \frac{T_{pp}(x,t) - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} \quad \text{ec. VIII.4}$$

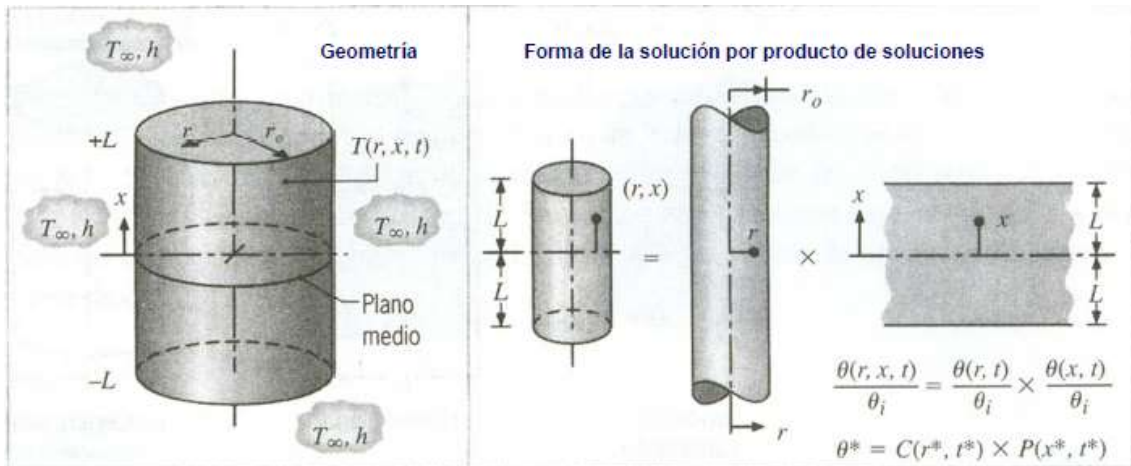


Figura VIII.1 Esquema de las geometrías y las variables pertenecientes a cada una [11]

A continuación se expondrán las ecuaciones de los distintos  $\theta^*$  para cada sistema 1D:

Pared plana infinita  $\theta_{pp}^* = P(x^*, t^*)$ :

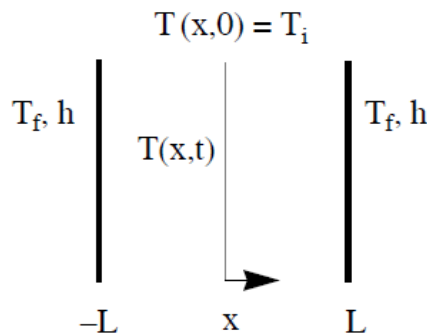


Figura VIII.2 Esquema del problema de pared plana infinita []

$$\theta^* = \sum_{i=1}^{\infty} C_i \exp(-\zeta_i^2 Fo \cos(\zeta_i x^*)) \quad \text{ec. VIII.5}$$

Para el que se define:

$$C_i = \frac{4 \operatorname{sen}(\zeta_i)}{2\zeta_i + \operatorname{sen}(2\zeta_i)} \quad \text{ec. VIII.6}$$

$$\zeta_i \operatorname{tg}(\zeta_i) = Bi \quad \text{ec. VIII.7}$$

$$Fo = \frac{at}{L^2} \quad \text{ec. VIII.8}$$

$$Bi = \frac{hL}{\lambda} \quad \text{ec. VIII.9}$$

$$x^* = \frac{x}{L} \quad \text{ec. VIII.10}$$

Para  $Fo \geq 0.2$  la serie converge fuertemente pudiéndose utilizar la siguiente aproximación:

$$\theta^* \approx C_1 \exp(-\zeta_1^2 Fo) \cos(\zeta_1 x^*) \quad \text{ec. VIII.11}$$

Cilindro infinito  $\theta_{cil}^* = P(r^*, t^*)$ :

$$\theta^* = \sum_{i=1}^{\infty} C_i \exp(-\zeta_i^2 Fo) J_0(\zeta_i r^*) \quad \text{ec. VIII.12}$$

$$\zeta_i \frac{J_1(\zeta_i)}{J_0(\zeta_i)} = Bi \quad \text{ec. VIII.13}$$

$$Bi = \frac{hr_0}{\lambda} \quad \text{ec. VIII.14}$$

$$r^* = \frac{r}{r_0} \quad \text{ec. VIII.15}$$

$$Fo = \frac{at}{r_0^2} \quad \text{ec. VIII.16}$$

Para  $Fo \geq 0.2$  la serie vuelve a converger fuertemente pudiéndose utilizar la siguiente aproximación:

$$\theta^* \approx C_1 \exp(-\zeta_1^2 Fo) \cos(\zeta_1 r^*) \quad \text{ec. VIII.17}$$

VIII.2 Código EES:

$$\rho = 1560$$

$$c_p = 980$$

$$\Lambda = 0,85$$

$$\alpha = \frac{\Lambda}{\rho \cdot c_p}$$

$$h_{cr} = 12$$

$$T_{camara} = 15$$

$$T_{inicial} = 40$$

$$L_{\text{probeta}} = \frac{180}{1000}$$

$$x_{\text{pos}} = \frac{0}{1000}$$

$$L_{\text{biot}} = \frac{L_{\text{probeta}}}{2}$$

$$\text{Biot}_{\text{pp}} = h_{\text{cr}} \cdot \frac{L_{\text{biot}}}{\Lambda}$$

$$\text{FO}_{\text{pp}} = \frac{\alpha \cdot \text{tiempo}}{L_{\text{biot}}}$$

$$\chi_i \cdot \tan(\chi_i) = \text{Biot}_{\text{pp}} \quad \text{for } i = 1 \text{ to } 5$$

$$C_i = 4 \cdot \left[ \frac{\sin(\chi_i)}{2 \cdot \chi_i + \sin(2 \cdot \chi_i)} \right] \quad \text{for } i = 1 \text{ to } 5$$

$$\text{termino}_i = C_i \cdot \cos \left[ \chi_i \cdot \frac{x_{\text{pos}}}{L_{\text{biot}}} \right] \cdot \exp \left[ - \frac{\chi_i^2}{L_{\text{biot}}^2} \cdot \alpha \cdot \text{tiempo} \right] \quad \text{for } i = 1 \text{ to } 5$$

$$\text{aver}_i = \exp \left[ - \frac{\chi_i^2}{L_{\text{biot}}^2} \cdot \alpha \cdot \text{tiempo} \right] \quad \text{for } i = 1 \text{ to } 5$$

$$\frac{T_{\text{pp}} - T_{\text{camara}}}{T_{\text{inicial}} - T_{\text{camara}}} = \sum_{i=1}^5 (\text{termino}_i)$$

$$r_{\text{pos}} = \frac{8}{1000}$$

$$r_0 = \frac{8}{1000}$$

$$\text{Biot}_{\text{cil}} = h_{\text{cr}} \cdot \frac{r_0}{\Lambda}$$

$$\text{FO}_{\text{cil}} = \frac{\alpha \cdot \text{tiempo}}{r_0^2}$$

$$\frac{T_{\text{cil}} - T_{\text{camara}}}{T_{\text{inicial}} - T_{\text{camara}}} = \exp \left[ - \frac{h_{\text{cr}} \cdot 2}{\rho \cdot c_p \cdot r_0} \cdot \text{tiempo} \right]$$

$$\frac{T - T_{\text{camara}}}{T_{\text{inicial}} - T_{\text{camara}}} = \left[ \frac{T_{\text{pp}} - T_{\text{camara}}}{T_{\text{inicial}} - T_{\text{camara}}} \right] \cdot \left[ \frac{T_{\text{cil}} - T_{\text{camara}}}{T_{\text{inicial}} - T_{\text{camara}}} \right]$$

### VIII.3 Evolución de la temperatura en diferentes puntos

A continuación se exponen las gráficas de evolución de la temperatura para diferentes puntos de la probeta. En las gráficas se podrá observar la evolución para la pared plana infinita y el cilindro infinito para cada punto, estas evoluciones solo representan las diferentes dinámicas para los dos sistemas 1D. La curva que nos interesa es la curva solución que surge, una vez tenemos la solución para cada sistema 1D, de resolver la ecuación VIII.4. De donde despejaremos  $T_{sol}$  para cada instante.

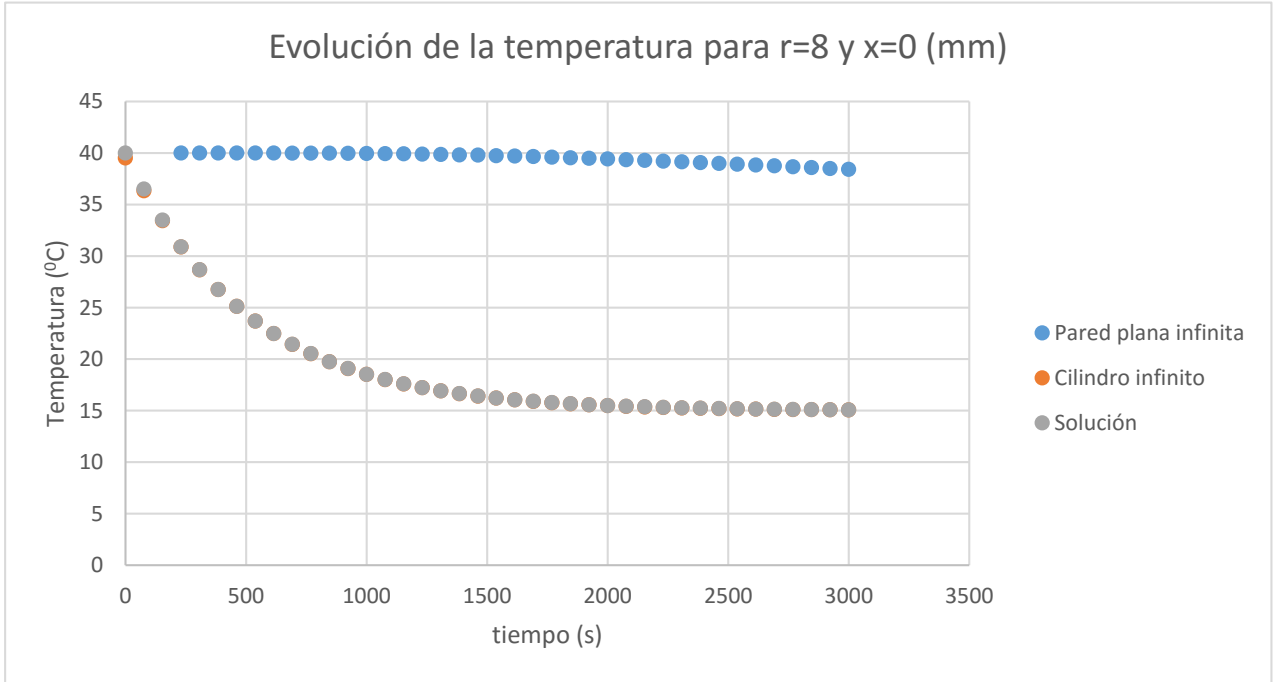


Figura VIII.3 Evolución de la temperatura para  $r=8$  y  $x=0$  (mm)

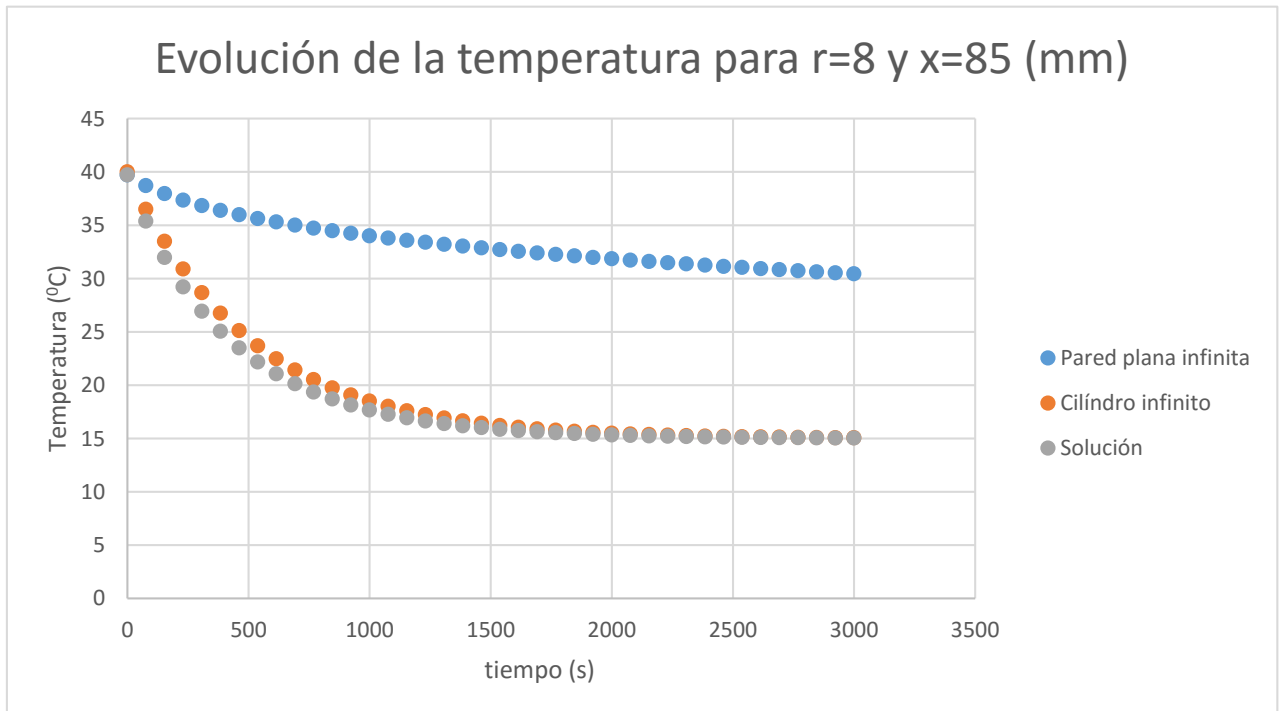


Figura VIII.4 Evolución de la temperatura para  $r=8$  y  $x=85$  (mm)

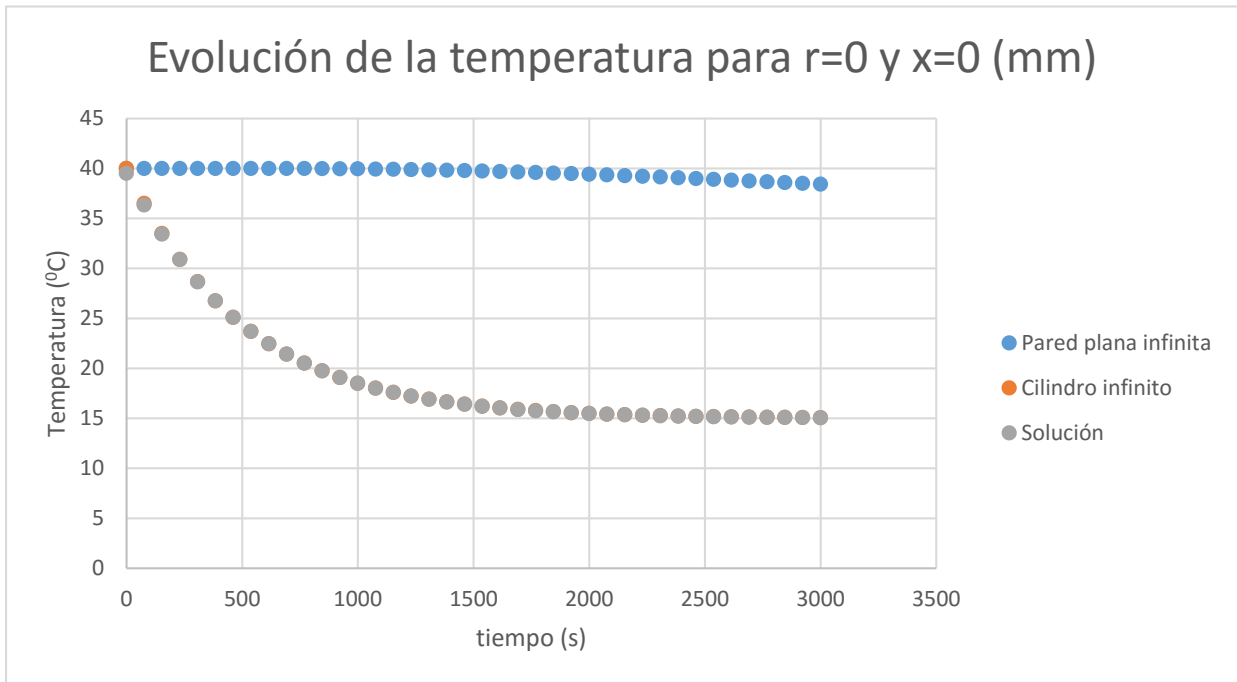


Figura VIII.5 Evolución de la temperatura para  $r=0$  y  $x=0$  (mm)

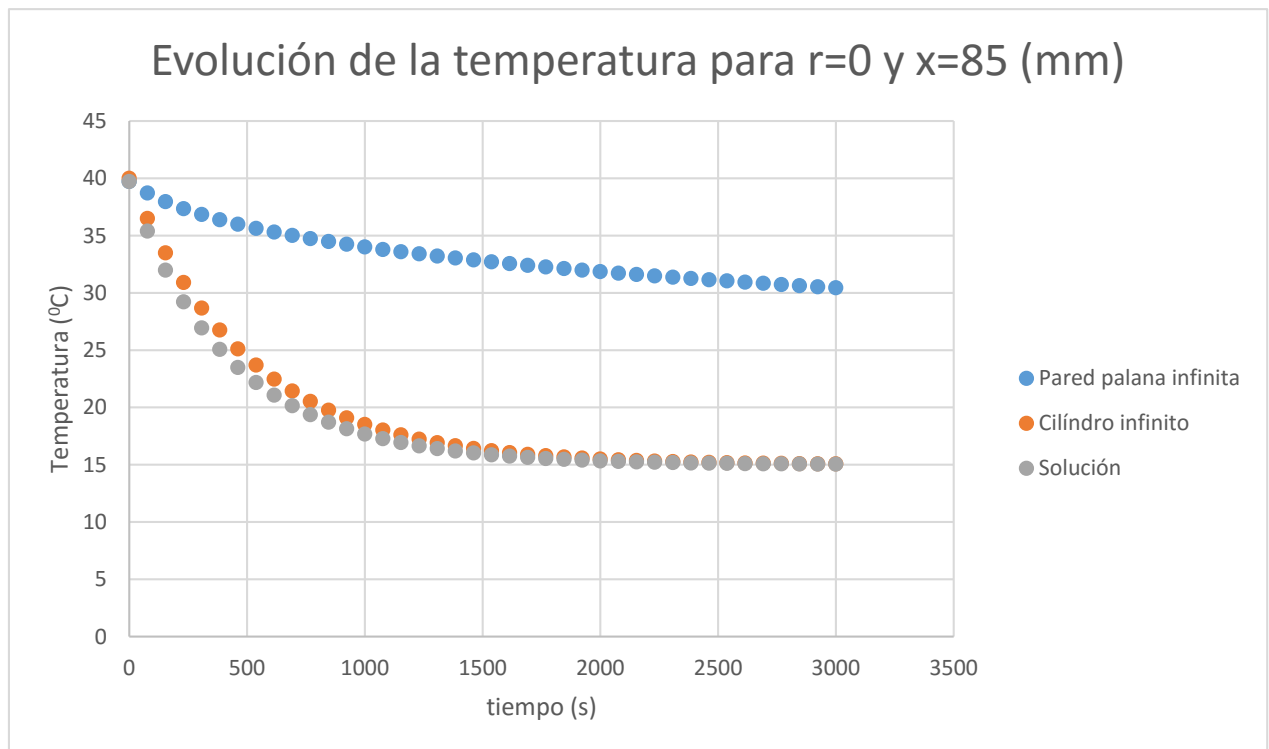


Figura VIII.6 Evolución de la temperatura para  $r=0$  y  $x=85$  (mm)

## Nomenclatura

|                |  |
|----------------|--|
| A              | área [m <sup>2</sup> ]   |
| c <sub>p</sub> | calor específico a presión constante [J/kg·K]  |
| D              | diámetro [m]   |
| DSC            | calorimetría diferencial de barrido  |
| e              | error, espesor [m]   |
| h              | coeficiente de transferencia de calor [W/m <sup>2</sup> ·K], entalpía [J/kg]         |
| h <sub>m</sub> | entalpía asociada al cambio de fase sólido-líquido [J/kg]                            |
| L              | longitud [m]   |
| m              | masa [kg]  |
| q              | flujo de calor [W/m <sup>2</sup> ]   |
| R              | resistencia eléctrica [ohmios, Ω], resistencia térmica [K·m <sup>2</sup> /W]         |
| r              | radio [m]  |
| t              | tiempo [s], total  |
| T              | temperatura (absoluta en K, diferencias en °C o K)                                   |
| U              | coeficiente global de transferencia de calor [W/m <sup>2</sup> ·K]                   |
| $\hat{h}$      | entalpía aproximada (con error de medida)  |
| $\hat{c}_p$    | capacidad calorífica medida aproximada (con error de medida)                         |
| q'''           | generación interna (W/m <sup>3</sup> ) Transformación de un tipo de energía en otra. |
| $\dot{T}$      | evolución temporal de la temperatura o velocidad de cambio de temperatura [K/s]      |

### Letras griegas

|            |  |
|------------|--|
| $\tau$     | constante de tiempo [s]  |
| $\alpha$   | difusividad térmica [m <sup>2</sup> /s]                            |
| $\epsilon$ | emisividad   |
| $\lambda$  | conductividad térmica [W/(m·K)]                                    |
| $\nu$      | viscosidad cinemática [m <sup>2</sup> /s]                          |
| $\rho$     | densidad [kg/m <sup>3</sup> ]                                      |
| $\beta$    | coeficiente de expansión térmica [°C <sup>-1</sup> ]               |
| $\sigma$   | constante de Stefan-Boltzmann [W m <sup>-2</sup> K <sup>-4</sup> ] |
| $\Delta$   | incremento   |
| $\theta$   | resta de temperaturas [K ó °C], componente azimutal                |
| $\delta$   | error  |

## Subíndices

|          |  |
|----------|--|
| aisl     | aislante   |
| prob     | probeta  |
| sol      | solución   |
| c        | en contacto  |
| a        | ambiente   |
| cond     | conducción   |
| conv     | convección   |
| int      | integración  |
| l        | líquido  |
| med      | medida   |
| mr       | media radiante   |
| p        | PCM  |
| rad      | radiación  |
| ref      | referencia   |
| r        | temperatura de equilibrio con el sistema, respuesta, componente radial |
| s        | sólido, superficie   |
| w        | agua   |
| $\infty$ | zona alejada de superficie   |
| 0        | inicial  |
| t        | tubo   |
| m        | temperatura de cambio de fase [K]                                      |
| i        | paso (método de integración), inicial                                  |
| pp       | pared plana infinita   |
| cil      | cilindro infinito  |
| eq       | equivalente  |

## Números adimensionales

|     |                    |
|-----|--------------------|
| Bi  | número de Biot     |
| Nu  | número de Nusselt  |
| Pr  | número de Prandtl  |
| Ra  | número de Rayleigh |
| Ste | número de Stefan   |
| Fo  | numero de Fourier  |



## Bibliografía

- [1] Vijuesca M.J. Adaptación de la metodología T-history para determinación de curvas entalpía-temperatura de materiales compuestos para aplicaciones de construcción. Trabajo de final de grado depositada y presentada en la Universidad de Zaragoza, diciembre 2015.
- [2] 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.
- [3] Marín J.M. C. Monné J.Uche Transferencia de calor Universidad de Zaragoza, 1998
- [4] 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.
- [5] 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
- [6] Zalba Nonay, B. Tesis doctoral: “Almacenamiento térmico de energía mediante cambio de fase. Procedimiento experimental”. Universidad de Zaragoza. Abril 2002.
- [7] 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.
- [8] NF EN 197-1 Avril 2012Ciment - Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants
- [9] Instrucción de hormigón estructural (EHE-08)
- [10] Norma UNE-EN 197-1:2011. Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes. AENOR, 2011. Fecha de última revisión: 08/11/2015.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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*.
- [14] Creus Solé, Antonio. Instrumentación industrial. 4ª edición, 1989. MARCOMBO, S.A.
- [15] Ibáñez, M., Lázaro, A., Zalba, B., Cabeza, L.C., An approach to the simulation of PCMs building applications TRNSYS, 2004.
- [16] Mazo, J., Delgado, M., Marín, J. M., Zalba, B., Modeling a radiant floor system with Phase Change Material (PCM) integrated into buildings simulation tool: Analysis o case study of a floor heating system coupled to a Heat pump. 2011.

- [17] Soares, N., Costa, J.J., Gaspar, A.R., Santos, P., Review of passive PCM Latent Heat thermal energy storage systems toward buildings' energy efficiency. 2012.
- [18] Pomianowski, M., Heiselberg, P., Zhang Y., Review of thermal storage technologies based on PCM application in buildings. 2013.
- [19] 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.
- [20] Zalba, B., Marín J.M., Cabeza, L.F, Mehling, H., Review on thermal energy storage with phase change: Materials, Heat transfer analysis and applications. 2002.
- [21] 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
- [22] 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. [23]
- [23] <http://www.rubitherm.eu/>
- [24] <http://es.omega.com/>
- [25] 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.
- [26] <http://www.hormigon-altas-prestaciones.com/aditivos-para-hormigon>