

Phase change materials performance at radiant floor heating systems for building purposes study

Estudio del comportamiento de los materiales de cambio de fase en sistemas de calefacción por suelo radiante de aplicación en construcción

BEATRIZ CÁMARA-CALZAS

ETS de Ingeniería Civil. Universidad Politécnica de Madrid, España
b.camaracalzas@gmail.com

ALEJANDRO GÓMEZ-DELGADO

ETS de Ingeniería Civil. Universidad Politécnica de Madrid, España

ELENA CERRO-PRADA

ETS de Ingeniería Civil. Universidad Politécnica de Madrid, España.
elena.cerro@upm.es

ROSALÍA PACHECO-TORRES

ETS de Ingeniería Civil. Universidad Politécnica de Madrid, España
rosalia.pachecho@upm.es

Recent research in the field of building materials has led to focus on phase change materials (PCMs). These materials allow the adjustment between energy demand and supply of the climate control systems by storing. Experiments were carried out to investigate the feasibility of using heat storage materials (with PCM addition), placed as one of the flooring layers over radiant floor heating system. In this study, paraffin wax ASTM D 87 (MP 53-57°C) has been added directly during the mixing stage as a PCM, used in mixtures with various contents of paraffin (0,75%, 1,5%, 2,5% with respect to the weight of cement. It was also produced a none paraffin content specimen) and 0,45 water/cement ratio cement mortar. The experiments have been carried out inside of a completely isolated thermal box in which a heating system has been arranged and a measurement equipment for the temperature record. Every experiment consist on four stages that complete the full process of charging the energy storage mortar specimens, by heating the system fluid, and its subsequent progressive discharge after the heating source is off. While testing each specimen different temperatures have been collected: environment temperature outside the thermal box, indoor air temperature, surface temperature of each specimen with the corresponding PCM content, inlet and outlet fluid temperature inside heating system pipe. After carrying out every specimen test it is notice that PCM addition to cement mortar floor layer over the heating system is effective, the more proportion of paraffin added the most appropriate, since it takes a longer period of time to release storage heat during the phase change. Paraffin is an organic material easy to add to the cement mortar porous composition not adversely affecting material resistance, and it has the power to store energy as latent heat by phase changing.

Phase change materials; energy storage mortar; radiant floor heating system; thermal performance.

Las investigaciones en el campo de los materiales de construcción en los últimos años han llevado al estudio de materiales de cambio de fase (PCMs). Éstos permiten adaptar los periodos de suministro a los de demanda energética en sistemas de climatización, mediante la acumulación de energía. El objeto de los ensayos llevados a cabo en este trabajo es el estudio de la viabilidad del uso de materiales acumuladores de energía (mediante adición de PCM) como una de las capas de solado sobre los sistemas de calefacción por suelo radiante. En este estudio se trabaja con cera de parafina ASTM D 87 (MP 53-57°C) integrada en polvo de forma directa en diferentes proporciones (0,75%, 1,5%, 2,5% en peso de PCM y una probeta Control sin contenido de PCM) a una mezcla de mortero de cemento con relación agua/cemento 0,45, obteniendo cuatro probetas distintas a ensayar. Los experimentos se han llevado a cabo en el interior de una Casa térmica totalmente aislada en la que se instaló un sistema de calefacción por suelo radiante y un equipo de medida para el registro de la temperatura. Cada ensayo se compone de cuatro etapas que forman el proceso completo de carga del mortero acumulador de energía, calentando el fluido calefactor, y su posterior descarga progresiva una vez que la fuente de calor ha sido apagada. Durante los ensayos se recogieron temperaturas: en el exterior de la habitación, en el interior de la misma, sobre la superficie de cada probeta con la correspondiente proporción de PCM, y en el tubo de calefacción a la entrada y salida del agua. Tras llevar a cabo los ensayos sobre cada una de las probetas se observa que la adición de PCM al mortero de cemento formando parte del solado sobre el sistema de calefacción resulta eficaz, siendo la mayor proporción de parafina añadida la más adecuada, ya que desprende al ambiente más lentamente el calor acumulado durante el cambio de fase. La parafina es un compuesto orgánico que se puede impregnar en la estructura porosa de los materiales como el mortero de cemento, sin afectar a su resistencia, y tiene la capacidad de almacenar energía mediante su cambio de estado, en forma de calor latente.

Materiales de cambio de fase; mortero acumulador de energía; sistema de suelo radiante.

1. INTRODUCCIÓN

Los edificios, entendidos como construcciones para alojar y proteger al individuo del ambiente exterior, son uno de los sistemas de mayor consumo de energía y recursos, y como tal son objeto de la gestión para la eficiencia energética.

Los edificios de la Unión Europea son responsables del 40% de la demanda de energía primaria, del 60% de la demanda de electricidad, del 40% de las emisiones de CO₂ y del 50% del consumo de materias primas (Acciona Eficiencia Energética).

Concretamente en España el 55% aproximadamente de los edificios se construyeron con anterioridad al año 1980 y casi el 21% cuenta con más de 50 años. Esto significa que gran parte del parque edificado está obsoleto ante las nuevas y futuras prácticas para el ahorro de energía y reducción de emisiones, objeto de la actual construcción sostenible que *“se puede definir como aquella que teniendo especial respeto y compromiso con el medio ambiente, implica el uso eficiente de la energía y del agua, los recursos y materiales no perjudiciales para el medioambiente, resulta más saludable y se dirige hacia una reducción de los impactos ambientales”* [1].

La construcción tradicional, que hasta ahora se ha venido practicando, está muy arraigada y es necesario, para introducir un cambio que nos lleve a reducir el consumo y las emisiones de nuestros edificios, un enfoque hacia nuevas prácticas eficientes respaldadas por un marco normativo tanto a nivel europeo como nacional y una aplicación de políticas activas.

La más reciente normativa desarrollada por la Unión Europea y España respectivamente introduce en el sector las novedades precisas para hacer efectiva la aplicación de prácticas respetuosas con el medio ambiente, para la nueva construcción y la necesaria rehabilitación y renovación energética de los edificios existentes [2][3].

Dichas prácticas pueden ser pasivas o activas en su aplicación a la edificación, esto es, actuando sobre factores influyentes en el diseño de las construcciones de modo que resulte idóneo para la reducción del consumo y las emisiones, o implementando sistemas directamente reductores.

La adición de Materiales de Cambio de Fase (PCM por sus siglas en inglés) a los materiales de construcción mejora el almacenamiento térmico de los elementos de construcción. La presencia de elementos de construcción con alta inercia térmica reduce las fluctuaciones de temperatura en el interior y favorece la comodidad del usuario [4]. En comparación con otros materiales de construcción comunes, como la piedra, los PCM almacenan de 4 a 15 veces más calor [5]

Los sistemas de calefacción por suelo radiante son una alternativa eficiente y económica a los sistemas de calefacción

comunes en los edificios. Además, combinados con materiales de almacenamiento térmico, brindan la oportunidad de mejorar la inercia térmica del pavimento y convertirse en una estrategia más eficiente en energía a la par que mejoran el confort térmico del usuario.

Años después de la celebración del Protocolo de Kioto, en 1990, que implantaba en la Unión Europea el objetivo de reducir las emisiones de CO₂ un 5,2% por debajo de los niveles correspondientes a aquel año, fue redactada la Directiva 2002/91/CE que más tarde daría lugar a la actual Directiva 2012/27/UE de Eficiencia Energética cuyo objetivo principal es asegurar que los edificios de la Unión Europea alcancen un 20% de ahorro energético.

Eficiencia energética es “la obtención de los mismos bienes y servicios energéticos, pero con mucha menos energía, con la misma o mayor calidad de vida, con menos contaminación, a un precio inferior al actual, alargando la vida de los recursos y con menos conflicto” [6]. Dentro de los sistemas que promueven la eficiencia energética en el interior de las edificaciones, podemos situar la instalación de sistemas de calefacción por suelo radiante, una alternativa económica a largo plazo frente a los sistemas de calefacción comunes en los edificios.

En el campo de la ingeniería de materiales los PCM resultan de aplicación principalmente cuando se requiere reducir o suavizar cambios bruscos de temperatura interior. M. Domínguez et al [7], entre otros, analizaron las posibles aplicaciones de PCM en centros de telecomunicación y estratégicos que incrementarían la seguridad ante dichos cambios de temperatura.

Estos materiales también pueden incorporarse directamente a los aparatos eléctricos y así lo demostraron Dong-won Yoo y Yogendra K. Joshi [8]. Analizaron el rendimiento de dos tipos de disipadores de calor híbridos que incorporaban PCM, reproduciendo ciclos de energía periódicos para simular las cargas térmicas transitorias de los componentes electrónicos.

Sus resultados indicaron que los PCM pueden proporcionar potencialmente sendos ahorros de energía para dispositivos de gestión térmica, tales como ventiladores de refrigeración eléctrica, así como de tamaño de los dispositivos de control térmico, tales como disipadores de calor.

Mohammed M. Farid y Rafah M. Husian [9] desarrollaron de forma teórica y experimental un calentador de almacenamiento eléctrico mediante la incorporación de cera de parafina comercial, que trabajaba fuera de las horas pico, generalmente durante la noche. Analizaron el rendimiento del sistema, utilizando un modelo unidimensional, con el fin de reducir las cargas de trabajo de los sistemas tradicionales de calefacción, que funcionan con calor sensible. Izquierdo-Barrientos et al [10] estudiaron experimentalmente el comportamiento de PCM de un lecho fluido utilizando aire

como fluido calefactor.

El almacenamiento de calor por parte del PCM se comparó con el almacenamiento de energía sensible de un material tradicional como es la arena. El lecho fluido con PCM mostró eficiencias de carga mayores que la arena, y un alto índice de flujo másico de fluido calefactor redujo el tiempo de carga aunque de eficiencia al reducir las dimensiones del mismo.

Avci y Yazici [11] construyeron un modelo de unidad de almacenamiento térmico de carcasa y tubo horizontal y estudiaron experimentalmente los procesos de fusión y solidificación de parafina en el interior de la unidad para el almacenamiento de energía. También investigaron la influencia de la temperatura de entrada del flujo calefactor, en su caso agua, sobre la fusión y la solidificación que el proceso de fusión aumentó debido al efecto de convección natural, mientras que durante la solidificación este efecto fue suprimido por la conducción.

El almacenamiento de agua caliente sanitaria para su empleo en sistemas de energía solar y la reutilización del calor residual fue estudiado por H. Mehling et al [12]. Instalando módulos de PCM en la parte superior del tanque de almacenamiento demostraron teórica y experimentalmente que se trata de una técnica que proporciona al sistema mayor densidad de almacenamiento, permitiendo recalentar la capa de agua de transición después de una descarga parcial y compensar la pérdida de calor en la capa superior durante un tiempo considerable.

La combinación de un sistema de calefacción por suelo radiante con el empleo de materiales de almacenamiento térmico, como son los PCM, brinda la oportunidad de mejorar la inercia térmica del conjunto y convertirse en una estrategia más eficiente energéticamente a la par que mejoran el confort térmico del usuario.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El principal objetivo de este trabajo es estudiar sistemáticamente el rendimiento de PCM (en este caso, cera de parafina) en un sistema de calefacción por suelo radiante de uso doméstico en una vivienda residencial.

Se ha llevado a cabo un programa experimental para explorar la variación de la inercia térmica del pavimento de mortero con diferentes contenidos de PCM. La experimentación se ha realizado en una habitación térmica a escala de laboratorio en la que se instala un sistema de calefacción por suelo radiante, sobre la que se colocan probetas de mortero de cemento con contenido de parafina en diferentes proporciones.

Una vez puesto en marcha este sistema, se ha procedido a la recopilación de las diferentes temperaturas que facilitarán el posterior análisis del comportamiento de las probetas, con la finalidad de hallar el contenido más apropiado en parafina,

y posibilitar su modelización para aplicación en construcción.

2.1 EQUIPO EXPERIMENTAL

El equipo empleado para la realización del estudio se compone de:

- ◆ Casa térmica (PHYWE, Modelo 04507-93)
- ◆ Fuente de alimentación 0...12V DC/ 6V-12V AC (PHYWE)
- ◆ Circuito eléctrico de bloques (PHYWE)
- ◆ Bomba de aspiración de agua $Q_{m\acute{a}x} = 240$ l/h, $H_{m\acute{a}x} = 300$ cm
- ◆ Hornillo eléctrico 230 V (Severin)
- ◆ Vaso con camisa termostática ($V = 250$ ml, $\varnothing_{\acute{u}til} \times h_{\acute{u}til} = 72 \times 68$ mm)
- ◆ Tubo flexible unicapa PVC extruido $\varnothing_{int} = 4$ mm
- ◆ Tubo flexible unicapa PVC extruido $\varnothing_{int} = 8$ mm
- ◆ Tubo aislante FOAM
- ◆ Vaso de precipitados 400 ml, forma corta (DURAN)
- ◆ Probeta de mortero de cemento, relación a/c = 0,45 (fabricada en el laboratorio), en adelante Specimen 0: Control, S0
- ◆ Probeta de mortero de cemento, relación a/c = 0,45, contenido de parafina 0,75% (fabricada en el laboratorio), en adelante Specimen 1: 0,75% of PCM, S1
- ◆ Probeta de mortero de cemento, relación a/c = 0,45, contenido de parafina 1,5% (fabricada en el laboratorio), en adelante Specimen 2: 1,5% of PCM, S2
- ◆ Probeta de mortero de cemento, relación a/c = 0,45, contenido de parafina 2,5% (fabricada en el laboratorio), en adelante Specimen 3: 2,5% of PCM, S3
- ◆ Medidores digitales de temperatura (PHYWE)
- ◆ Termopares NiCr-Ni $T_{m\acute{a}x} = 500^{\circ}C$
- ◆ Termómetro de mercurio y termómetro de alcohol
- ◆ Cámara de video
- ◆ Cronómetro digital

A continuación se describen los elementos fundamentales.

- Casa térmica (PHYWE, Modelo 04507-93)

Consiste en una estructura compuesta por seis paneles desmontables conformando un prisma de dimensiones 400x400x400 mm. Cuatro de ellos disponen de una abertura cuadrada en el centro, de dimensiones 210x210 mm, donde se sitúan las paredes a ensayar: apretadas con tornillos tensores las que se colocan desde el interior, y sujetas con presillas las que se colocan desde el exterior. En el caso de

este estudio se colocarán paneles de poliestireno expandido, tanto en el interior como en el exterior, de los que no ensayaremos su comportamiento.

Los dos paneles restantes son el suelo, aislado con una placa de poliestireno de 50 mm de espesor, y el techo aislado de la misma forma, con cuatro tornillos moleteados prisioneros que lo fijan a la estructura y permiten acceder a su contenido.

En el interior, la Casa térmica dispone de un portalámparas situado en el suelo para la instalación de calefacción por medio de una bombilla, en nuestro caso no lo utilizaremos.

Para la facilidad de montaje y desmontaje de los distintos elementos dentro de la Casa térmica, ésta se colocará de forma que el techo atornillado sea la pared frontal de la estructura.

Los paneles laterales de la estructura se atornillan mediante cuatro piezas auxiliares de madera, o angulares, situadas en las esquinas interiores de la Casa térmica.

Cada una de estas piezas está atravesada por un paso de diámetro $\varnothing = 9$ mm aislado con goma espuma para permitir la estanqueidad del interior. A través de dichos pasos introduciremos tanto los termopares como el tubo en serpentín para la instalación de calefacción.

- Vaso con camisa termostática ($V = 250$ ml, $\varnothing_{\text{útil}} \times h_{\text{útil}} = 72 \times 68$ mm)

Consiste en una pieza de vidrio de dimensiones $\varnothing_{\text{útil}} \times h_{\text{útil}} = 72 \times 68$ mm, que funciona como depósito de agua. Esta pieza cuenta con dos boquillas a diferentes alturas, a las que se conecta el tubo en serpentín de la instalación de calefacción; salida de agua caliente por la boquilla más baja, y entrada de agua que regresa cerrando el circuito por la boquilla más alta.

- Tubo flexible unicapa PVC extruido

Es el elemento que conduce el agua, impulsada por la bomba, de la instalación de calefacción, con un diámetro de $\varnothing_{\text{int}} = 8$ mm a la entrada y salida de la bomba de aspiración de agua, y de $\varnothing_{\text{int}} = 4$ mm a lo largo del serpentín. Sale del depósito de agua, al que se une mediante una pieza auxiliar, y entra en la Casa térmica por uno de los pasos aislados.

Una vez dentro, recorre el suelo anclado por remaches a un panel de madera de espesor $e = 9$ mm, dispuesto en forma de serpentín. Por último sale por el paso aislado opuesto y entra al depósito de agua cerrando así el circuito de calefacción.

A lo largo de su recorrido exterior, este tubo está recubierto de tubo aislante FOAM, de forma que la temperatura ambiente del laboratorio, en el exterior de la Casa térmica, no influya en la temperatura del agua de circulación. En los tramos de recorrido interior también se aísla el tubo del aire interior.

- Probetas de mortero cemento con adición de parafina

Se dispone de cuatro probetas, o specimens, para el estudio de dimensiones $210 \times 210 \times 20$ mm, sometidas a control normalizado, todas ellas compuestas por mortero de cemento en relación $a/c = 0,45$. La primera de ellas, S0, no contiene adición de parafina; la segunda S1, contiene una adición de parafina de 0,75%; la tercera, S2, contiene una adición de parafina de 1,50%; la cuarta, S3, contiene una adición de parafina de 2,50%. La parafina, añadida al mortero de cemento, es el material de cambio de fase, en adelante PCM, objeto de nuestro estudio.

Cada una de las probetas, según se disponga a lo largo del desarrollo del estudio, se colocará en el suelo sobre la placa de madera a la que está anclado el tubo en serpentín. Para ello se han fijado cuatro soportes a la placa de madera de forma que sustenten la probeta sin que ésta presione el tubo. Además, cada probeta se ha aislado en su perímetro con poliestireno expandido para asegurar la estanqueidad de la instalación de calefacción.

2.2 EQUIPO DE MEDIDA

◆ Termopares NiCr-Ni

Miden la variación de fuerza electromotriz en función de la temperatura y el medidor digital lo transforma a la unidad de temperatura, en el caso de este estudio grados Celsius, °C. Su denominación se debe a la composición de sus electrodos, el positivo con Ni+10%Cr, y el negativo con Ni+5%Si. Estos termopares, o sensores de temperatura, miden hasta una temperatura máxima de 500 °C, aunque el rango de temperaturas que se maneja en el estudio es mucho menor.

◆ Medidores digitales de temperatura

Para este estudio se dispone de dos medidores que conectados a los termopares NiCr-Ni reflejan la temperatura que éstos reciben en cada una de sus localizaciones. A cada medidor se pueden conectar dos termopares, o sensores de temperatura, de forma que las distintas temperaturas que ambos recogen se refleja en la pantalla líquida del medidor (de dimensiones 40×50 mm). Estos aparatos funcionan con una pila de 9 V y manejan las unidades Fahrenheit y Celsius.

2.3 MONTAJE DEL DISPOSITIVO DE ENSAYO

Con el fin de ensayar el comportamiento de la parafina como aditivo al mortero de cemento formando parte de las capas de solado, cualquiera que sea éste, sobre un sistema de calefacción de suelo radiante y poder modelizarlo para su aplicación como técnica de construcción sostenible, se reproduce una habitación a escala para testarla en el laboratorio.

2.3.1 CASA TÉRMICA PHYWE

El laboratorio en el que se desarrolla la fase experimental de este estudio pone a disposición a tal fin la Casa térmica PHYWE, Modelo 04507-93, como dispositivo fundamental para realizar los ensayos, anteriormente descrita. Este dispositivo alojará en su interior el sistema de suelo radiante objeto del experimento, y los sensores de temperatura que medirán el incremento de ésta durante el desarrollo de cada prueba.

2.3.2 CONJUNTO DE PAVIMENTACIÓN

En este estudio se ensayan cuatro probetas distintas, de dimensiones 210x210x20 mm, descritas detalladamente más adelante, de mortero de cemento con distinto contenido en parafina, material objeto del ensayo.

La probeta es la última capa de las que componen el conjunto de pavimentación (Figura 1) del estudio reproduciendo un solado tradicional en construcción de los utilizados sobre los sistemas de calefacción por suelo radiante.

Bajo la probeta se dispone el tubo de calefacción, de 205 cm de longitud total en contacto con ésta, por el que circula el fluido que cederá el calor a ésta. Este tubo se fija a la siguiente capa de solado formada por una tabla de madera de dimensiones 250x250x7 mm. Entre el tubo y la probeta no existe contacto directo ya que la sobre la capa de madera se disponen unas patillas de soporte sobre las que reposa la probeta sin que ésta ejerza presión sobre el tubo de calefacción.



Figura 1. Esquema de conjunto de pavimentación

2.3.3 HABITACIÓN A ESCALA DE LABORATORIO

El conjunto de pavimentación (1) se coloca en el interior de la

Casa térmica (2), y bajo éste el sistema de calefacción. El tubo por el que circula el fluido calefactor (3), en este caso agua, se conecta a un depósito en el exterior (4) y una bomba de aspiración de agua (5) proporciona la potencia motriz necesaria para la circulación del fluido por todo el sistema.

Como se observa en la Figura 2, el tubo de calefacción, que contiene el agua de circulación, entra a la Casa térmica, por medio de un paso aislado situado en su base. En el interior de la misma se fija con grapas, a la tabla de madera anteriormente mencionada, el tubo recorriéndola en forma de serpentin para obtener mayor superficie de contacto con el pavimento que aumente la cesión de calor.

Sobre la misma tabla se colocan también cuatro patillas de soporte sobre los que descansa la probeta de pavimento de forma que ésta, por su peso, no ejerza presión sobre el tubo que pueda originar la obstrucción del mismo, actuando así de separadores.

Cada probeta a ensayar se aísla en su perímetro con poliestireno expandido (6) de forma que el fragmento de tubo en serpentin instalado debajo no pierda calor en su cesión a la superficie de probeta. El tubo de calefacción sale de la Casa térmica por el paso aislado situado en el extremo opuesto de la base.

Dentro de la habitación se colocan cuatro termopares, o sensores de temperatura, dispuestos en los puntos clave para la toma de datos del estudio.

Estos puntos son: la entrada de agua, el sensor se introduce en el tubo realizando un pequeño orificio en éste y sellándolo después con pegamento bifásico en el punto de inicio del recorrido en serpentin; la salida de agua, el sensor se coloca de igual manera en el interior del tubo en el punto final del recorrido en serpentin, de forma que ambos queden en contacto directo con el agua; la superficie de suelo, el sensor se fija a una de las paredes en el interior de la habitación y se pone en contacto directo con la superficie de la probeta que se coloque en cada ensayo; el aire interior, el sensor se coloca en el centro geométrico de la habitación y se fija al techo. [Fig. 2]

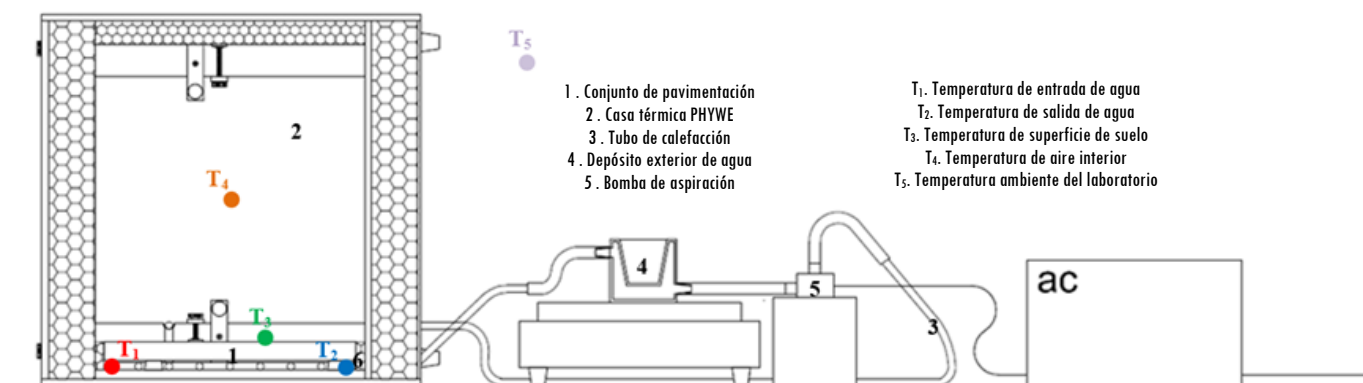


Figura 2. Esquema de habitación a escala de laboratorio

2.3.4 SISTEMA DE CALEFACCIÓN

En el exterior de la Casa térmica, el tubo de calefacción inicia su recorrido en el depósito que contiene el fluido calefactor, que como ya se ha mencionado, en este caso es agua. En el ensayo se emplea un vaso con camisa termostática, de 250 ml de volumen, como depósito.

Éste cuenta con un orificio inferior de salida al que se conecta el arranque del tubo, de 8 mm de diámetro interior, por el que comienza a circular el agua. A continuación el tubo se une a la bomba de aspiración, con una caudal máximo de $Q_{m\acute{a}x} = 240 \text{ m}^3/\text{s}$, que hace circular el agua por el circuito. Tras salir de la bomba el fluido continúa su recorrido por el tubo en el exterior, en el que su diámetro interior cambia a 4 mm por medio de empalme, y entra a la Casa térmica por el mencionado paso aislado.

Dentro de la habitación el agua recorre el tubo en forma de serpentín, reproduciendo un sistema de calefacción por suelo radiante como los empleados en construcción, cuya finalidad es incrementar la superficie de contacto entre el tubo y las capas de pavimento, en comparación con otros sistemas, obteniendo una mayor eficiencia térmica.

Saliendo por el paso aislado situado en el extremo opuesto, el tubo vuelve a conducir el agua al depósito, cambiando su diámetro interior de nuevo mediante empalme a 8 mm, y entra por el orificio superior de éste, cerrando así el circuito.

El sistema tiene un volumen total de 150 ml de agua circulando en su interior. Este agua se calienta colocando el depósito (1) sobre un hornillo eléctrico de temperatura regulable, conectado a la corriente.

De esta forma, cuando se conecta a la corriente la bomba de aspiración (2) ésta toma el agua del depósito, calentado previamente, que comienza a circular por el tubo (3), aislado del exterior en todo su recorrido mediante coquillas de FOAM para evitar cualquier pérdida de calor en la totalidad del sistema de calefacción.

A lo largo del serpentín (4) el agua va cediendo a la probeta de suelo el calor aportado por el hornillo, para calentar el interior de la habitación, por lo que ésta sale de la Casa

térmica a una temperatura menor que la de entrada.

El agua continua su recorrido, de nuevo por el exterior, por el tubo (5) aislado mediante coquillas y retorna al depósito (1) donde de nuevo se calienta cerrando el circuito de calefacción. El recorrido completo que hace el fluido calefactor se muestra en la Figura 3.

2.3.5 PROBETAS A ENSAYAR

Como se ha explicado con anterioridad, en el interior de la Casa térmica se coloca una probeta de mortero de cemento. Éste es un material empleado en construcción para una de las capas del conjunto que forma el solado sobre los sistemas de calefacción por suelo radiante, en este ensayo el solado estará compuesto únicamente por esta capa.

Esto se debe a que, además de ser la que se coloca sobre el tubo de calefacción en contacto directo con el mismo distribuyendo la energía, al ser el mortero una pasta heterogénea, se puede añadir a su composición cualquier aditivo con el fin de influir en sus propiedades, en este caso la parafina.

Por su parte, la parafina es un compuesto orgánico que habitualmente se presenta como nanomaterial, en microcápsulas que envuelven un núcleo de cera, lo que facilita su adición a materiales de estructura porosa como es el mortero de cemento, sin afectar sus propiedades.

Cada una de las cuatro probetas a ensayar fue fabricada siguiendo el mismo proceso obteniéndose una mezcla de mortero de cemento con una relación agua/cemento de 0.45, incrementado en un 20% las proporciones de material que corresponderían a un mortero de cemento normalizado.

En el caso de la probeta control, sin contenido en parafina, primeramente se tararon las cantidades de cada componente de la dosificación para obtener la relación agua/cemento de 0.45 citada (540 g de cemento, 1200 g de árido tamizado y 243 g de agua).

Posteriormente se llevó a cabo el amasado, durante 2 minutos en amasadora, de la mezcla añadiendo cada material en sucesivas etapas. Tras el reposo necesario de la mezcla, se

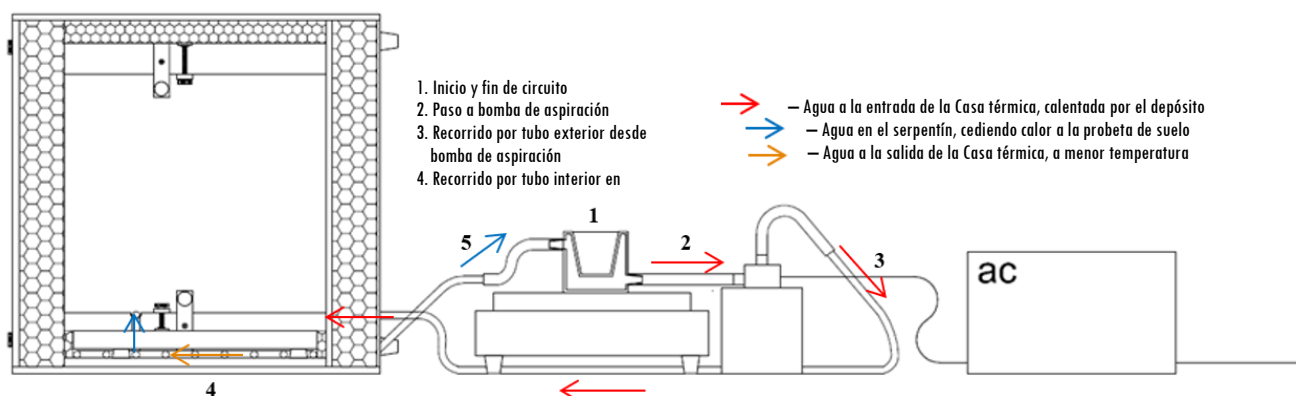


Figura 3. Esquema de recorrido del fluido calefactor

vertió la misma sobre un molde de silicona, se extendió y se compactó. Tras reposar el tiempo preciso, se desmoldó y se mantuvo la probeta resultante durante un periodo determinado en una cámara húmeda.

El mismo procedimiento fue llevado a cabo en las tres probetas restantes con contenido en parafina mp 53-57°C ASTM D 87 (Aldrich), la cual, una vez rallada, se añadió a su tiempo durante el amasado (en las distintas cantidades 48,57 g, 29,14 g y 9,71 g).

Así, las probetas sobre las que se realiza el estudio son:

- ♦ Probeta control, S0 (Specimen 0): compuesta únicamente por mortero de cemento con relación agua/cemento 0,45 (sin adición de parafina), de dimensiones 210x210x20 mm.
- ♦ Probeta 0,75% PCM, S1 (Specimen 1): compuesta por mortero de cemento con relación agua/cemento 0,45 y adición de parafina en un 0,75% sobre el peso total de mortero de cemento, de dimensiones 210x210x20 mm.
- ♦ Probeta 1,5% PCM, S2 (Specimen 2): compuesta por mortero de cemento con relación agua/cemento 0,45 y adición de parafina en un 1,5% sobre el peso total de mortero de cemento, de dimensiones 210x210x20 mm.
- ♦ Probeta 2,5% PCM, S3 (Specimen 3): compuesta por mortero de cemento con relación agua/cemento 0,45 y adición de parafina en un 2,5% sobre el peso total de mortero de cemento, de dimensiones 210x210x20 mm.

2.4 METODOLOGÍA DESARROLLADA

Los ensayos se llevan a cabo en el Laboratorio de Física de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Civil de la Universidad Politécnica de Madrid, utilizando los medios a disposición anteriormente descritos.

Se controlan las condiciones ambientales en el interior del laboratorio de modo que se mantengan estables durante el desarrollo de cada ensayo y no resulten muy dispares entre cada uno de ellos, esto es, se mide la temperatura ambiente de laboratorio con termómetro de alcohol, room temperature T5, y se recurre a la ventilación del laboratorio si se observa que la temperatura se eleva. Para testear cada probeta se emplean 10 horas diarias, de modo que el total de los ensayos se desarrolla a lo largo de cuatro días diferentes.

Este rango de tiempo resulta adecuado para la recopilación de un amplio conjunto de datos que permite analizar detalladamente el comportamiento de cada probeta en función del tiempo, pasando por cada una de las etapas que conforman el ensayo. En total se suceden cuatro etapas, regidas por el estado de la bomba de aspiración de agua en cada momento, encendido "1" (on) o apagado "0" (off) como muestra la Figura 4.

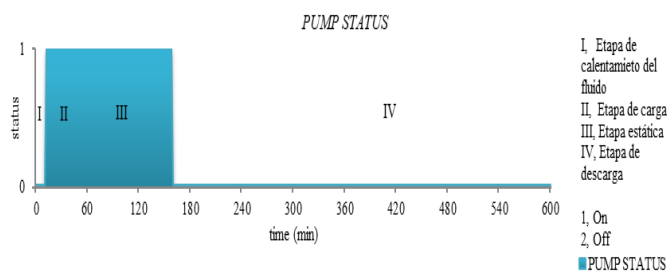


Figura 4. Estado de la bomba de aspiración en función del tiempo

La Etapa I transcurre durante el calentamiento del fluido, por medio de la fuente de calor, en el depósito hasta alcanzar 60°C con la bomba de aspiración de agua apagada "0"; seguidamente en la Etapa II empieza a circular el fluido por el tubo de calefacción una vez que la bomba está encendida "1", es decir, arranca el funcionamiento del sistema de calefacción y la probeta comienza a acumular el calor que le cede el tubo a en su recorrido; a continuación se da paso a la Etapa III, o estática, que tiene lugar una vez que la temperatura del aire interior de la Casa térmica, indoor air temperature T4, alcanza 25°C manteniéndola estable durante 120 min con la bomba encendida "1"; finalmente a lo largo de la Etapa IV la probeta descarga el calor acumulado hasta completar las 10 horas de duración del ensayo con la bomba de nuevo apagada "0".

2.4.1 CONDICIONES DE PARTIDA

De forma general, un ensayo comienza a primera hora de la mañana, con la Casa térmica abierta, de modo que la temperatura en el interior sea aproximadamente igual a la temperatura ambiente del laboratorio, y la probeta a ensayar colocada en su posición en el interior de la Casa térmica.

El interruptor que conecta el circuito de circulación del fluido en el interior del sistema de calefacción está abierto y la fuente de calor, el hornillo eléctrico de temperatura regulable, apagado.

2.4.2 ETAPA DE CALENTAMIENTO DEL FLUIDO, I

Con la Casa térmica cerrada, se enciende la fuente de calor, a la temperatura de trabajo más baja, y se coloca sobre ella el depósito de agua hasta alcanzar una temperatura aproximada de 60°C en su interior, medida con el termómetro de alcohol. A continuación se cierra el circuito eléctrico para que comience a circular el agua caliente por el interior del tubo de calefacción.

2.4.3 ETAPA DE CARGA, II

Iniciada la circulación del fluido calefactor, la temperatura media en el interior (entre las lecturas de temperatura en la

entrada de agua, inlet temperature T1, y en la salida de agua, outlet temperature T2) del tubo se estabiliza alrededor de 50°C.

Puesto que el volumen de agua circulando por el tubo de calefacción, 250 ml, es relativamente pequeño y por tanto sensible a la variación térmica, se controla que la temperatura del fluido se mantenga constante. Siguiendo este procedimiento, el agua a su paso por el tubo desprenderá el calor aportado y, ya que el sistema está completamente aislado y las pérdidas son despreciables, la probeta de mortero lo absorberá para después liberar una parte al ambiente, de forma que aumenta la temperatura en el interior de la Casa térmica.

Esta fase finaliza cuando la temperatura del aire interior de la Casa térmica, indoor air temperature T4, alcanza 25°C, una temperatura suficiente para que el descenso hasta la temperatura de partida se desarrolle durante el tiempo necesario para recopilar datos bastantes y analizar el comportamiento de la probeta. Durante el desarrollo de esta fase el material, además de liberar parte del calor absorbido al ambiente interior, almacena el resto de calor, el cual también liberará, aunque de forma progresiva y diferente según la composición de cada probeta.

2.4.4 ETAPA ESTÁTICA, III

Tras alcanzar la temperatura deseada en el aire interior de la Casa térmica, 25°C, se da paso a una fase en la que esta temperatura permanezca estática, procediendo de la misma forma expuesta en la fase anterior, siendo en este caso los intervalos de aporte de calor del doble de tiempo y aumentando progresivamente. En esta fase, si bien las temperaturas T1, T2, y T4 se mantienen estables en sus rangos, la temperatura de la superficie de suelo (o probeta), floor surface temperature T3, seguirá aumentando. Su duración se ha fijado en 120 minutos para todos los ensayos.

2.4.5 ETAPA DE DESCARGA, IV

Cuando finalizan los 120 minutos de la etapa estática se abre el circuito eléctrico, parando la bomba de aspiración, de forma que el agua deje de circular por el interior y se apaga la fuente de calor. De este modo, la probeta que ha ido almacenando el calor latente, comenzará a liberarlo al ambiente gradualmente hasta finalizar el tiempo de desarrollo del ensayo, fijado en 10 horas, aproximándose a la temperatura de partida en mayor o menor medida según la influencia del contenido de parafina en su comportamiento.

2.4.6 RECOPIACIÓN DE DATOS

A lo largo de cada ensayo se recolectan las lecturas que registran los medidores digitales de temperatura de las cuatro sondas colocadas en el interior de la Casa térmica.

Estas lecturas son: temperatura del agua en la entrada, inlet temperature T1; temperatura del agua en la salida, outlet temperature T2; temperatura de la superficie de suelo, floor surface temperature T3; temperatura del aire en el interior de la Casa térmica, indoor air temperature T4; todas indicadas anteriormente en la Figura 2. La recopilación se hace a intervalos de dos minutos a lo largo de las 10 horas de duración del ensayo.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De la totalidad de los ensayos se obtiene una vasta cantidad de datos que permite la consecución del objeto de este estudio, analizar el comportamiento de cada una de las probetas y la comparación entre ellas mediante distintos parámetros.

3.1 CONTENIDO DE PARAFINA

A la luz de los resultados de cada ensayo se observa que para semejantes condiciones de partida y a lo largo del ensayo, siguiendo la misma metodología, en función de su contenido en parafina las probetas muestran distinto comportamiento.

Para interpretar este comportamiento centramos el análisis en el registro de las temperaturas: temperatura del aire en el interior de la Casa térmica, indoor air temperature T4, y temperatura de suelo, floor surface temperature T3, es decir, en el intercambio de calor que existe entre el suelo y el aire interior de la habitación consecuencia del funcionamiento del sistema de calefacción.

Se desglosan a continuación los gráficos de representación del registro de datos, que muestran una ecuación temperatura-tiempo, en cada una de las etapas del ensayo y se estudia su pendiente, que relaciona el incremento o descenso de la temperatura con el tiempo.

◆ Comportamiento de probeta Control, S0

Durante la Etapa I de este ensayo (de 0 a 8 minutos), de calentamiento del fluido, la pendiente es horizontal para ambas ecuaciones de temperatura T3 y T4, ya que en este momento el fluido aún no ha comenzado a circular por el tubo de calefacción.

A continuación, en la Etapa II de este ensayo (de 10 a 42 minutos), de carga, la pendiente de la ecuación de temperatura T3 es 0,4294 y la de T4 es 0,2189, aproximadamente la mitad.

Seguidamente se sucede la Etapa III (de 44 a 162 minutos), estática, en la que las pendientes de las ecuaciones de temperatura T3 y T4 son respectivamente -0,0322 y -0,0012, sin relación destacable entre ellas. En la Etapa IV, la de mayor duración y recopilación de datos (de 164 a 600 minutos), de descarga, la pendiente de la ecuación de

temperatura T3 es $-0,0204$ y la de T4 es $-0,0134$, siendo la relación $T3/T4 = 1,5$. (Figura 5).

♦ Comportamiento probeta con adición de $0,75\%$ PCM, S1

Durante la Etapa I de este ensayo (de 0 a 10 minutos), de calentamiento del fluido, la pendiente es horizontal para ambas ecuaciones de temperatura T3 y T4, ya que en este momento el fluido aún no ha comenzado a circular por el tubo de calefacción.

A continuación, en la Etapa II de este ensayo (de 12 a 42 minutos), de carga, la pendiente de la ecuación de

temperatura T3 es $0,4074$ y la de T4 es $0,2022$, aproximadamente la mitad.

Seguidamente se sucede la Etapa III (de 44 a 162 minutos), estática, en la que las pendientes de las ecuaciones de temperatura T3 y T4 son respectivamente $-0,0274$ y $0,0028$, sin relación destacable entre ellas.

En la Etapa IV, la de mayor duración y recopilación de datos (de 164 a 600 minutos), de descarga, la pendiente de la ecuación de temperatura T3 es $-0,0197$ y la de T4 es $-0,0117$, siendo la relación $T3/T4 = 1,7$. (Figura 6)

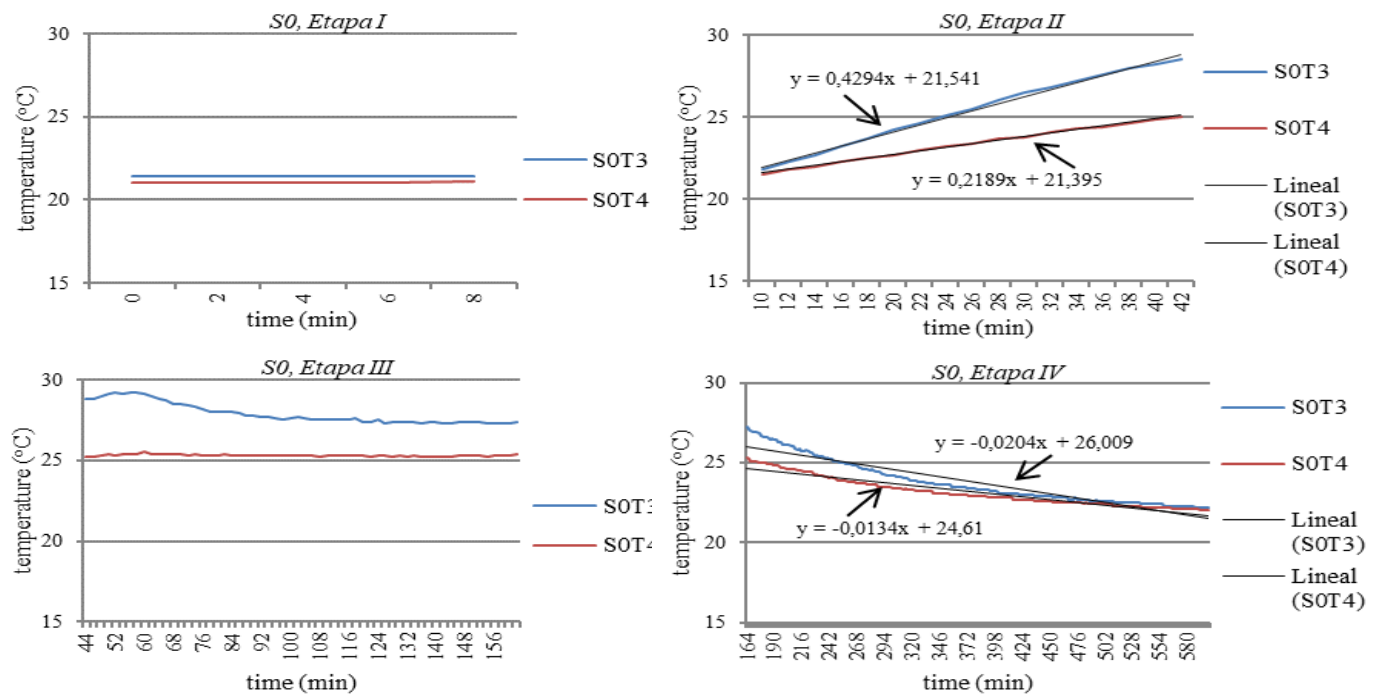


Figura 5. Comportamiento de probeta Control, S0, por etapas

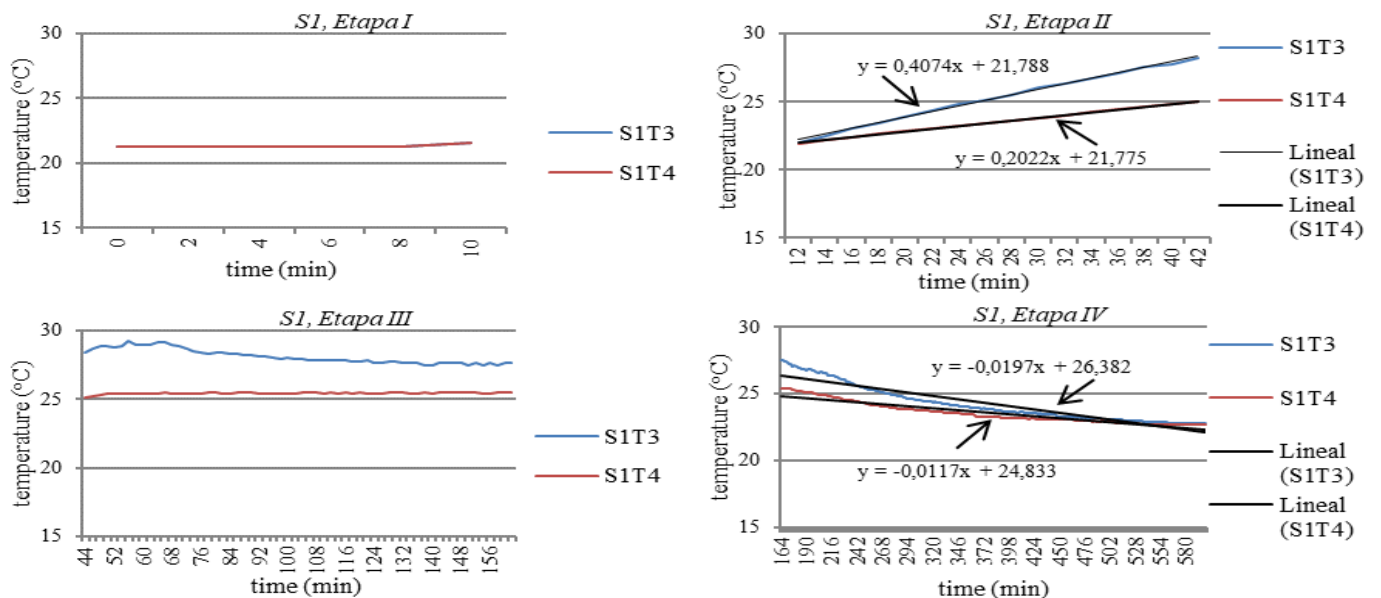


Figura 6. Comportamiento de probeta con adición de 0.75% PCM, S1, por etapas

◆ Comportamiento probeta con adición de 1,5% PCM, S2

Durante la Etapa I de este ensayo (de 0 a 8 minutos), de calentamiento del fluido, la pendiente es horizontal para ambas ecuaciones de temperatura T3 y T4, ya que en este momento el fluido aún no ha comenzado a circular por el tubo de calefacción. A continuación, en la Etapa II de este ensayo (de 10 a 34 minutos), de carga, la pendiente de la ecuación de temperatura T3 es 0,4198 y la de T4 es 0,1912, aproximadamente la mitad. Seguidamente se sucede la Etapa III (de 36 a 154 minutos), estática, en la que las pendientes de las ecuaciones de temperatura T3 y T4 son respectivamente -0,0315 y -0,0012, sin relación destacable entre ellas. En la Etapa IV, la de mayor duración y recopilación de datos (de 156 a 600 minutos), de descarga, la pendiente de la ecuación de temperatura T3 es -0,0179 y la de T4 es -0,0116, siendo la relación T3/T4 = 1,5. (Figura 7)

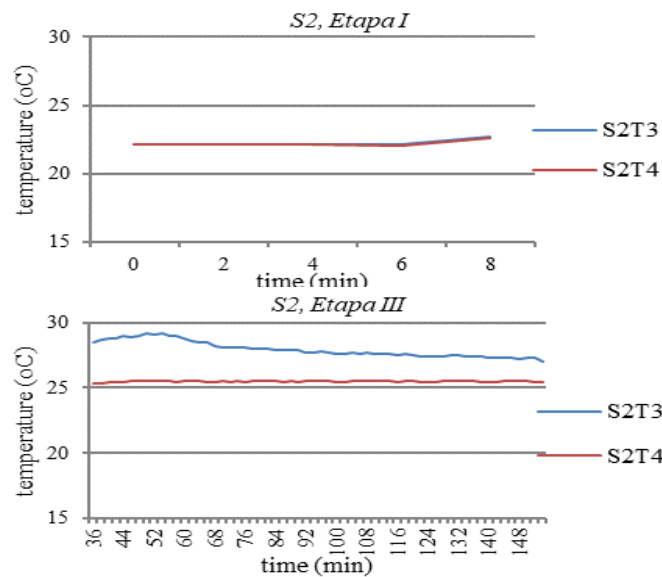


Figura 7. Comportamiento de probeta con adición de 1.5% PCM, S2, por etapas

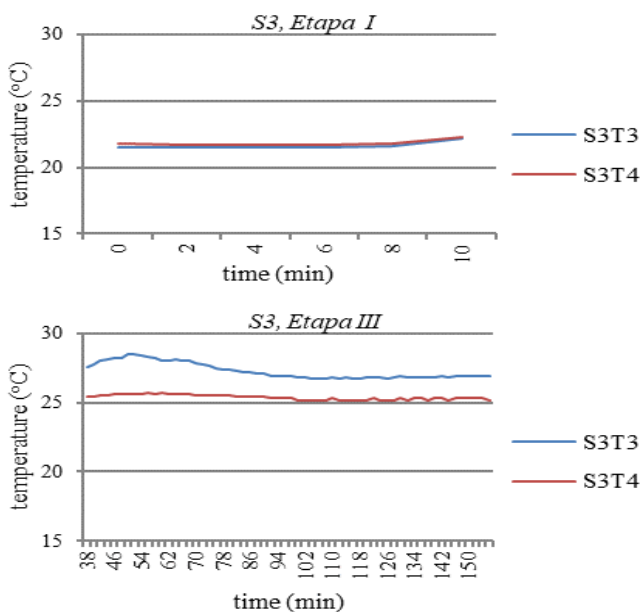
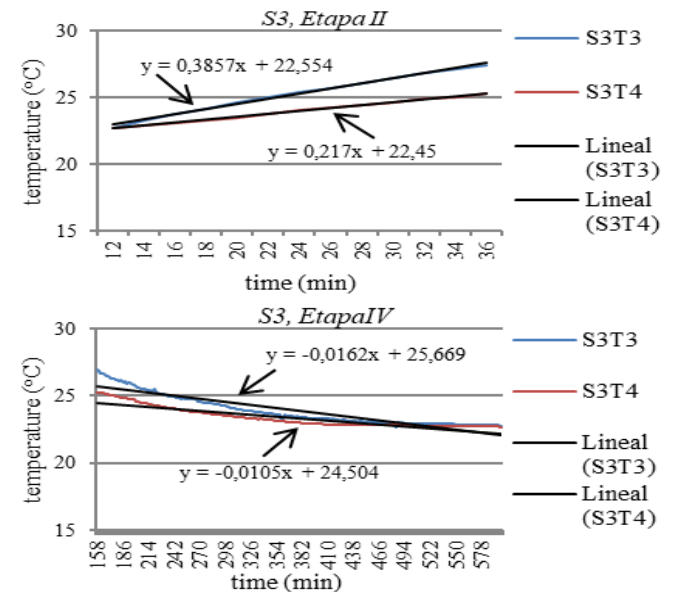
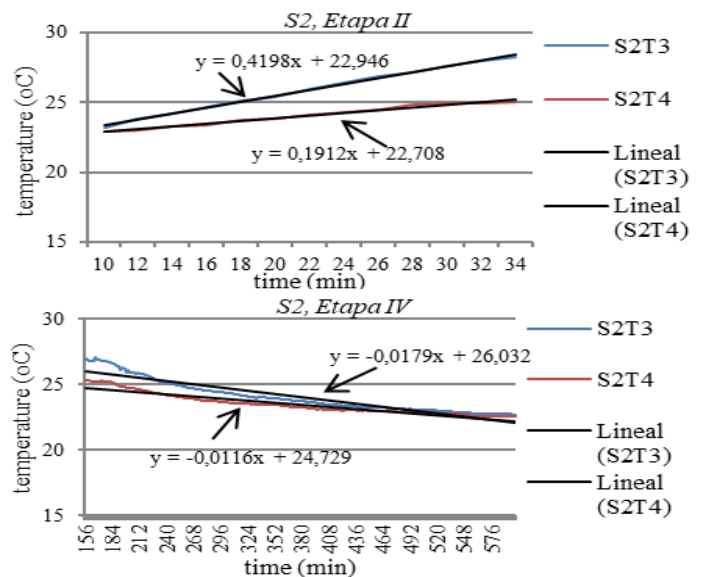


Figura 8. Comportamiento de probeta con adición de 2.5% PCM, S3, por etapas

◆ Comportamiento probeta con adición de 2,5% PCM, S3

Durante la Etapa I de este ensayo (de 0 a 10 minutos), de calentamiento del fluido, la pendiente es horizontal para ambas ecuaciones de temperatura T3 y T4, ya que en este momento el fluido aún no ha comenzado a circular por el tubo de calefacción. A continuación, en la Etapa II de este ensayo (de 12 a 36 minutos), de carga, la pendiente de la ecuación de temperatura T3 es 0,3857 y la de T4 es 0,217, aproximadamente la mitad. Seguidamente se sucede la Etapa III (de 38 a 156 minutos), estática, en la que las pendientes de las ecuaciones de temperatura T3 y T4 son respectivamente -0,0274y -0,0067, sin relación destacable entre ellas. En la Etapa IV, la de mayor duración y recopilación de datos (de 158 a 600 minutos), de descarga, la pendiente de la ecuación de temperatura T3 es -0,0162 y la de T4 es -0,0105, siendo la relación T3/T4 = 1,5. (Figura 8)



Mediante las pendientes se observa (Tabla 1) que la Etapa II, de carga, no muestra a simple vista una relación determinante, aunque sí aproximadamente la misma en todos los ensayos siendo la temperatura de suelo el doble de la del aire, con las etapas posteriores en las que realmente se percibe una cesión de calor gradual.

Podríamos establecer que esta cesión inicia en la Etapa III, estática, puesto que es cuando el fluido calefactor alcanza una temperatura casi estable, sin embargo, no es demostrable puesto que destaca el, todavía, incremento de temperatura en la superficie de la probeta de suelo. De modo que se pone el foco en la Etapa IV, de descarga, que no sólo es aquella de mayor duración y registro de datos en la que se puede percibir de forma más evidente el comportamiento de la probeta, sino en efecto la que pone de manifiesto una clara relación entre las probetas y su distinta proporción de adición.

Probeta	Tª	Etapa	
		II	IV
S0	T3	0,4294	-0,0204
	T4	0,2189	-0,0134
S1	T3	0,4074	-0,0197
	T4	0,2022	-0,0117
S2	T3	0,4198	-0,0179
	T4	0,192	-0,0116
S3	T3	0,3857	-0,0162
	T4	0,217	-0,0105

Tabla 1. Relaciones destacables entre pendientes de cada probeta

Así, la probeta Control S0, con contenido nulo en parafina, es la que, además de iniciar la Etapa IV a una temperatura mayor (por las particularidades que se dieran en el ensayo a pesar de seguir la metodología desarrollada) experimenta una mayor y más rápida caída de temperatura, siendo esta caída más notable en la temperatura del aire interior de la Casa térmica.

Ésta es la probeta que finaliza el ensayo a la menor temperatura puesto que la cesión de calor al aire interior se produce aceleradamente una vez que se apaga la fuente de calor. Las probetas S1 y S2 evidencian un comportamiento muy parecido entre ellas, que podríamos asociar al contenido de parafina, 0.75% y 1.5% respectivamente, muy próximo entre ambas. No obstante, la probeta S1 sí muestra un comportamiento mejor al de la probeta S0, y a su vez peor al de la probeta S2. Esto es, la temperatura en la superficie de la probeta S1 cae menos aceleradamente, al igual que la temperatura en el aire interior de la Casa térmica, que la probeta S0, y lo mismo ocurre con la probeta S2, con la que se disminuye también esa caída respecto a S1.

La probeta S3, la de mayor contenido en parafina, presenta la caída de temperatura, tanto en la superficie de suelo como en el aire interior, más suave y gradual. Ésta es la probeta que a lo largo de la Etapa IV descarga el calor acumulado de forma más mantenida en el tiempo, al final del ensayo la temperatura alcanzada es más alta en relación al resto de probetas, ya que se ha conservado constante por más horas en su cesión al aire interior de la Casa térmica.

Traduciendo este análisis a términos porcentuales, y poniendo el foco en la temperatura del aire interior, objeto final a calefactar, ésta cae un 14% y un 15% más lento empleando las probetas S1 y S2 respectivamente en comparación con el empleo de la probeta S0. En el caso de la probeta S3, la temperatura del aire interior desciende un 27% más gradual en relación al descenso que experimenta esta temperatura estudiando la probeta S0.

Por consiguiente, del estudio de las pendientes obtenidas de la ecuación que relaciona la temperatura, en la superficie de la probeta y en el aire interior de la Casa térmica, y el tiempo, de cada una de las probetas, evidencia que el mejor comportamiento de probeta de suelo se obtiene para el mayor contenido en parafina y el peor comportamiento para el contenido nulo en parafina. Además, contrastando únicamente los ensayos sobre las probetas de mayor y nulo contenido en parafina se revela una considerable diferencia de comportamiento entre las dos, asociable a sus contrapuestos contenidos en parafina.

4. CONCLUSIONES

Las conclusiones más importantes de este estudio se detallan a continuación:

- Se observa que el mayor contenido de parafina en la composición del mortero de cemento resulta óptimo para el almacenamiento de energía durante la etapa de carga del pavimento recibiendo el calor cedido por el sistema de calefacción por suelo radiante.
- La temperatura en la superficie de la probeta con mayor contenido en parafina desciende 4.2°C a lo largo de la etapa de descarga, de 444 minutos de duración, mientras que la probeta de contenido nulo en parafina desciende 1°C más durante esta etapa.
- El uso de PCM en capas de pavimento sobre suelo radiante mejora la inercia térmica del conjunto, acumula el calor mientras éste es cedido por el sistema de calefacción y cuando la cesión finaliza el material comienza a descargar progresivamente el calor. Su aplicación como técnica de construcción permitiría el uso del sistema de calefacción por menos tiempo, ahorrando en coste y emisiones a la atmósfera, para mantener el calor durante un periodo más prolongado en la estancia a calefactar a una temperatura idónea.

d. El sistema de experimentación propuesto ha demostrado ser útil para verificar el comportamiento de cada probeta con distintos contenidos de PCM y ha permitido realizar un análisis de regresión para cada probeta ensayada.

En este estudio, al aumentar el contenido en parafina se observa una mejora en el comportamiento del material compuesto por mortero de cemento y el material de cambio de fase. Futuras líneas de investigación deberían explorar la eficiencia del sistema mediante el empleo de un mayor contenido de parafina, e incluso con un menor punto de fusión que pueda evidenciar de forma más consistente la mejora en el comportamiento del material compuesto. Además, resulta interesante explorar la posible existencia de una relación entre la distribución del material de cambio de fase en el interior de la estructura del mortero de cemento y la eficiencia del material compuesto.

Se propone el empleo de parafina en partículas de mayor tamaño a las obtenidas mediante el rallado de la cera, de manera que puedan distribuirse fácilmente de forma manual a la hora de fabricar la probeta de mortero de cemento, y estudiar la distribución más eficiente para absorber y ceder el calor uniformemente.

5. REFERENCIAS

- [1] A. Ramírez, "La construcción sostenible". Física y sociedad, Monográfico energía. ISSN-e 1131-8953, N.º. 13 (2002) 30–33.
- [2] Parlamento Europeo. "Directiva 2012/27/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, relativa a la eficiencia energética". Octubre 2012.
- [3] Ministerio de la Presidencia. "Real Decreto 235/2013, por el que se aprueba el procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética de los edificios". Abril 2013.
- [4] K. Lin, Y. Zhang, X. Xu, H. Di, R. Yang, P. Qin, "Modeling and simulation of under-floor electric heating system with shape-stabilized PCM plates", *Build. Environ.* 39 (2004) 1427–1434. doi:10.1016/j.buildenv.2004.04.005.
- [5] J. Jeon, J.H. Lee, J. Seo, S.G. Jeong, S. Kim, "Application of PCM thermal energy storage system to reduce building energy consumption", *J. Therm. Anal. Calorim.* 111 (2013) 279–288. doi:10.1007/s10973-012-2291-9.
- [6] AEDENAT, CODA, CS de CCOO & UGT, *Ante el cambio climático, menos CO2*, 1998.
- [7] M. Domínguez, J. Culubret, D. García, C. García y A. Soto, «Posibilidades de los acumuladores de cambio de fase en la climatización.», *El instalador*, pp. 5-10, 2000.
- [8] D. Yoo y Y. Joshi, «Energy efficient thermal management of electronic components using solid-liquid phase change materials,» *IEEE Transactions on device and materials reliability*, vol. 4, n.º 4, 2004.
- [9] M. Farid y R. Husian, «An electrical storage heater using the phase-change method of heat storage,» *Energy Conversion and Management*, vol. 30, n.º 3, pp. 219-230, 1990.
- [10] M. Izquierdo-Barrientos, C. Sobrino y J. Almendros-Ibáñez, «Thermal energy storage in a fluidized bed of PCM,» *Chemical Engineering Journal*, vol. 230, pp. 573-583, 2013.
- [11] M. Avci y M. Yazici, «Experimental study of thermal energy storage characteristics of a paraffin in a horizontal tube-in-shell storage unit,» *Energy Conversion and Management*, vol. 73, pp. 271-277, 2013.

[12] H. Mehling, L. Cabeza, S. Hippeli y S. Hiebler, «PCM-module to improve hot water heat stores with stratification,» *Renewable Energy*, vol. 28, n.º 5, pp. 699-711, 2003.

WHAT DO YOU THINK?

To discuss this paper, please submit up to 500 words to the editor at bm.edificacion@upm.es. Your contribution will be forwarded to the author(s) for a reply and, if considered appropriate by the editorial panel, will be published as a discussion in a future issue of the journal.