

DINÁMICA DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE UN SUELO RADIANTE ELÉCTRICO CON RECUBRIMIENTO CERÁMICO DESMONTABLE

⁽¹⁾ V. Cantavella, ⁽¹⁾ E. Bannier, ⁽¹⁾ G. Silva, ⁽¹⁾ A. Muñoz, ⁽²⁾ J. Portolés,
⁽²⁾ E. Algora, ⁽³⁾ M. A. García

⁽¹⁾ Instituto de Tecnología Cerámica (ITC).

Asociación de Investigación de las Industrias Cerámicas (AICE)

Universitat Jaume I. Castellón. España

⁽²⁾ Taulell, S.A. Tau Cerámica. Castellón. España

⁽³⁾ Grupo Cecatherm. Gijón. España

RESUMEN

El confort térmico, unido a la eficiencia energética, son dos de los aspectos de mayor relevancia en el diseño de un sistema de calefacción de una vivienda. Permiten una mayor eficiencia térmica que los sistemas convencionales, debido a que el calor está mejor distribuido y el calentamiento de la vivienda es más homogéneo. Los sistemas basados en el suelo radiante aportan un entorno más higiénico, saludable y de bienestar.

En el presente trabajo se analizaron, en una primera fase, los perfiles de temperatura que aparecen, en estado estacionario, en un suelo radiante formado por varias capas: aislante, elemento calefactor eléctrico, sustrato de plástico y una pieza de pavimento. En una segunda fase se estudió experimentalmente el comportamiento de suelos radiantes con diferentes configuraciones, utilizando en todos los casos elementos calefactores eléctricos. Para realizar este estudio se diseñó un prototipo que reproducía las diferentes capas de un suelo radiante, se situaron sensores de temperatura en cada una de las capas, y finalmente se instaló un controlador *todo/nada* que permitía regular la temperatura superficial del dispositivo. Con ayuda de este montaje se analizó el comportamiento dinámico del suelo radiante: tiempo que tarda el suelo en alcanzar la temperatura programada, amplitud y frecuencia de las oscilaciones térmicas que se producen durante el funcionamiento en estado estacionario y el consumo energético del sistema.

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de calefacción por suelo radiante se basan en calentar el suelo de una habitación para que éste, a su vez, ceda calor a la estancia. Estos sistemas permiten una mayor eficiencia térmica que los convencionales (radiadores, bombas de calor, etc.), debido a que el calor está mejor distribuido y el calentamiento de la vivienda es más homogéneo, además de eliminarse las corrientes de aire [1,2].

Existen dos grandes familias de suelos radiantes. Suelos radiantes por acumulación y suelos radiantes de emisión directa. En el primer caso se hace circular agua caliente a través de tuberías situadas bajo de la solera (5-8 cm de espesor) actuando ésta de acumulador y el pavimento como elemento que lo cede. En el segundo caso, se usan resistencias eléctricas para calentar el suelo [3]. Estos segundos sistemas están compuestos de los siguientes elementos: forjado, aislante térmico, elemento calefactor eléctrico, sustrato de plástico y pavimento, además de un sistema de control para regular la temperatura, uso extendido en parquets o superficies plásticas [4].

En entornos sociosanitarios para mejorar la calidad de vida, la asociación alemana de alergia y asma ha realizado un estudio en que muestra que la calefacción por suelo radiante reduce las condiciones favorables para la proliferación de ácaros, en comparación con otros sistemas de calefacción, además de producir un menor movimiento de polvo que los sistemas de calefacción convectivos [5]. La temperatura local del suelo también puede influir en la salud, el estudio anterior observa que el enfriamiento agudo de los pies causa el comienzo de los síntomas del resfriado en el 10% de las personas del estudio (180). La calefacción radiante puede evitar el enfriamiento de los pies descalzos y por tanto ayudar a mantener la salud de sus ocupantes [6].

En el presente trabajo se analizaron, en una primera fase, los perfiles de temperatura que aparecen, en estado estacionario, en un suelo radiante eléctrico. Este cálculo permite conocer las capas en las que se producen las mayores caídas térmicas (menores transmitancias térmicas) y los factores que influyen en el rendimiento térmico. En una segunda fase se estudió experimentalmente el comportamiento de estos sistemas de calefacción. Para realizar este estudio se diseñó un prototipo que reproducía las diferentes capas de un suelo radiante, se situaron sensores de temperatura en cada una de las capas, y finalmente se instaló un controlador *todo/nada* que permitía regular la temperatura superficial del dispositivo. Con ayuda de este montaje se analizó el comportamiento dinámico y el consumo energético del sistema. Se estudiaron diferentes configuraciones, cambiando la tipología de las piezas de pavimento, la naturaleza del sustrato, el espesor del aislante, el tipo de forjado sobre el que se instala o la ubicación del sensor de temperatura de control.

2. TRANSFERENCIA DE CALOR EN UN SUELO RADIANTE

En este apartado se va a analizar el perfil de temperatura que se desarrolla, en estado estacionario, en un sistema de suelo radiante CIVIS' TERMIA®. Para realizar los cálculos se consideró un montaje formado por los siguientes elementos, en orden ascendente: solera adiabática (representa el forjado), sustrato de poliestireno (espesor: 2,5 mm, conductividad térmica: 0,16 W/(m·K)), elemento calefactor, soporte plástico adaptado del sistema de colocación en seco Drysystem® (espesor: 6,2 mm, conductividad térmica: 0,12 W/(m·K)), pieza cerámica (espesor: 8,5 mm, conductividad térmica: 0,12 W/(m·K)).

Además, para obtener el perfil térmico es necesario conocer el coeficiente de transmisión de calor por convección+radiación. Para ello se consultó la norma UNE-EN 1264-2 "Calefacción por suelo radiante. Sistemas y componentes. Parte 2: Determinación de la emisión térmica", que propone un coeficiente combinado convección+radiación (h_T) que viene determinado por la expresión:

$$h_T = 8,92(T_S - T_A)^{0.1}$$

Ecuación 1. [7]

Donde:

T_S : Temperatura de la superficie del suelo (K).

T_A : Temperatura del ambiente (K).

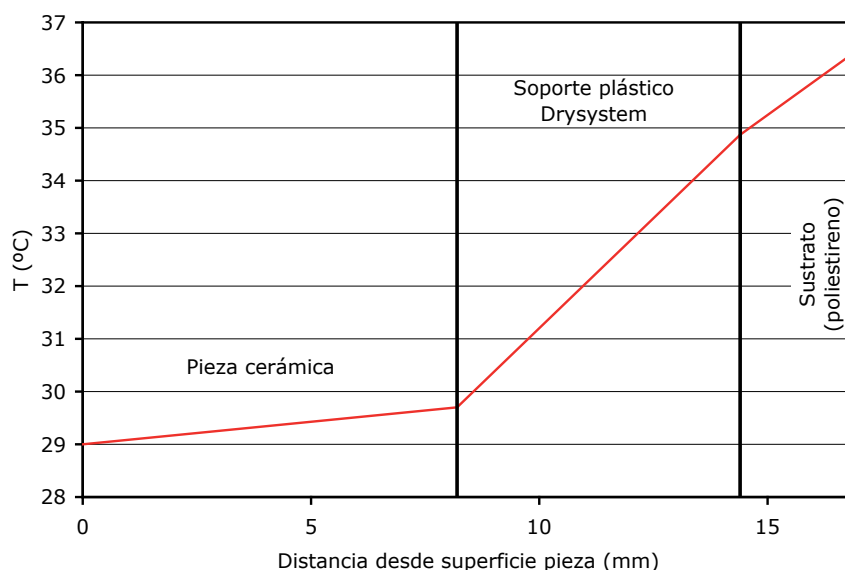


Figura 1. Perfil de temperatura en las diferentes láminas que forman el suelo radiante.

La ecuación 1 es simplemente una estimación del valor de h_T . Un cálculo más detallado requeriría conocer la emisividad de la superficie del suelo así como el

entorno en que se encuentra el mismo (temperatura de las paredes, presencia de ventanas, etc.).

Finalmente es necesario fijar la temperatura de la superficie de la pieza y del ambiente. Los valores se establecieron siguiendo la recomendación de la norma UNE-EN 1264-2, $T_s = 29\text{ °C}$ y $T_A = 20\text{ °C}$. En estas condiciones la densidad de flujo de calor queda completamente definida: $q_z = 100\text{ W/m}^2$ y es independiente de la configuración del suelo (número de láminas, espesores y conductividades), siempre que se admita que la solera es adiabática; es decir, siempre que el elemento calefactor se encuentre bien aislado respecto al forjado. La configuración del suelo influirá, sin embargo, en los perfiles de temperatura obtenidos.

En la figura 1 se muestra el perfil de temperatura, en estado estacionario, en las diferentes láminas que forman el suelo radiante. El perfil de temperatura es lineal dentro de cada lámina, observándose que la mayor caída térmica se da en el soporte plástico. Una resistencia térmica muy elevada de alguna de las capas podría conducir a un calentamiento excesivo del elemento calefactor; sin embargo, los cálculos indican que la temperatura del elemento calefactor alcanza $36,4\text{ °C}$, lo que es perfectamente admisible.

3. ESTUDIO EXPERIMENTAL EL COMPORTAMIENTO DE SUELOS RADIANTES. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL MONTAJE

El prototipo desarrollado para caracterizar los sistemas de suelos radiantes considerados se compone de los siguientes elementos (superpuestos uno encima del otro):

- una placa de aislante térmico.
- un elemento calefactor eléctrico.
- un sustrato de plástico.
- una muestra de pavimento.

La configuración estándar está formada por un aislante de poliestireno expandido de 20 mm de espesor, de un sustrato de polietileno de 0,35 mm y de un pavimento formado por un sistema de colocación en seco (soporte de plástico adaptado y modificado para la aplicación de suelo radiante + baldosa de gres porcelánico).

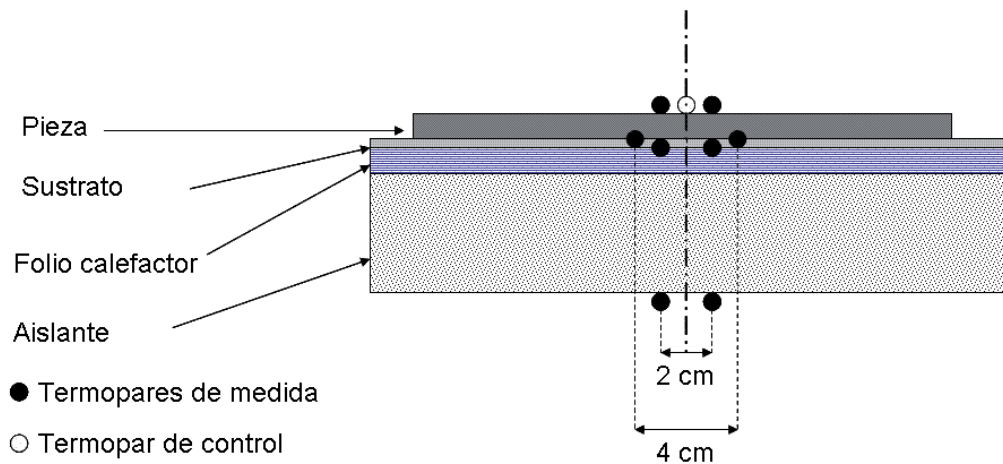


Figura 2. Esquema general del montaje usado, indicando la colocación de los termopares en el caso del sustrato estándar (polietileno).

Durante el ensayo, se mide la temperatura de cada elemento con dos termopares de contacto tipo T, tal y como se ilustra en la figura 2. Dichos termopares se colocaron cerca del centro del sistema, como se puede observar en figura 3. El elemento calefactor está regulado por un controlador de tipo todo o nada, usando la temperatura de la superficie superior de la pieza como variable de control. Durante el periodo de arranque, el sistema calienta la pieza hasta llegar a 29 °C. Luego, funciona en estado estacionario: el elemento calefactor vuelve a conectarse cuando la temperatura de control baja de 28 °C y se apaga al alcanzar de nuevo los 29 °C, conduciendo a ciclos de calentamiento y enfriamiento, tal y como se observa en la figura 4. Rigurosamente hablando no se trata de un estado estacionario, ya que las temperaturas van cambiando con el tiempo como consecuencia de las conexiones y desconexiones del controlador *todo/nada*.



Figura 3. Fotos mostrando la colocación de los termopares de medida sobre el elemento calefactor (izquierda), el sustrato de polietileno (centro) y la pieza (derecha).

Las mayores diferencias entre los diferentes suelos analizados se encuentran en el tiempo que tarda el sistema en alcanzar el estado estacionario, en la temperatura que alcanza el elemento calefactor, en la frecuencia de conexión y de desconexión del sistema de control y en la amplitud de la oscilación térmica de la superficie del suelo.

En estado estacionario, el consumo eléctrico también es una variable importante. En este trabajo, se ha evaluado a partir del tiempo de conexión de las

resistencias eléctricas. En consecuencia, puede existir cierto error en el consumo medido debido a los errores en la determinación del instante de la conexión y desconexión, que tenía una incertidumbre igual al intervalo de muestreo (5 ó 10 s, según los ensayos).

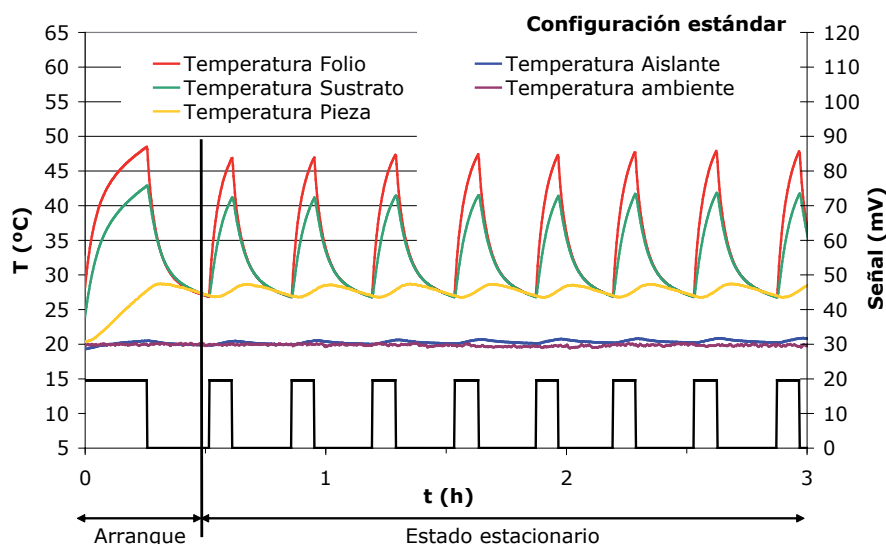


Figura 4. Distribución de temperaturas durante un ensayo típico.

4. ANÁLISIS DE DIFERENTES CONFIGURACIONES DE SUELO RADIANTE

4.1. Capas superiores.

4.1.1. Efecto de la tipología del pavimento y de la naturaleza del sustrato

En la primera fase del trabajo, se comprobaron las superficies habitualmente utilizadas en suelos radiantes y se estudiaron diferentes configuraciones de suelo radiante, cambiando el sustrato o el tipo de suelo (tabla 1) con respecto a la configuración estándar. En la tabla 2 se indican las diferentes configuraciones ensayadas así como las variables características del arranque: temperatura máxima alcanzada por el elemento calefactor (T_{Max}) y tiempo de calentamiento necesario para llegar a una temperatura superficial del suelo de 29 °C (t_i). Se muestran también las variables características del estado estacionario: consumo eléctrico (Q), frecuencia de conexión y desconexión del elemento calefactor (f), temperatura media del pavimento (T_p) y amplitud de variación de la misma (ΔT_p). Finalmente se indican los valores de temperatura ambiente (T_{amb}) tanto durante el arranque como en estado estacionario.

Tipo de pavimento	Referencia
CIVIS TERMIA®	CT
Parquet	PA
Moqueta	MO
Suelo plastificado	SP
Corcho	CO

Tabla 1. Tipos de pavimentos ensayados con los suelos radiantes.

El tiempo de calentamiento inicial varía desde unos 4 minutos (en el caso de la moqueta) hasta casi 30 minutos (suelo de corcho). Parece existir una correlación entre el espesor del sistema "sustrato+suelo" y la duración del primer ciclo de calentamiento. En particular podemos dividir los montajes estudiados en tres grupos: los más gruesos (montajes CO-SPo, CT-SPn, CT-SPa), que tardan entre 20 y 30 minutos en calentar, los intermedios (CT-SPo y PA-SPo) que alcanzan los 29 °C en 10 - 20 minutos y los más delgados (MO-SPo y SP-SPo) que tardan menos de 6 minutos para llegar a la temperatura de consigna.

Sustrato	Tipo de pavimento	Arranque			Estado estacionario				
		T_{amb} (°C)	T_{Max} (°C)	t_i (min)	T_{amb} (°C)	Q (W)	f (ciclo/h)	T_p (°C)	ΔT_p (°C)
Polietileno (SPo)	CT	18,7	47,1	18,5	18,7	13,4	3,2	27,5	1,8
Plástico negro (SPn)	CT	19,9	48,1	21,5	18,8	14,3	2,1	27,1	1,7
Plástico con lámina de Al (SPa)	CT	18,6	50,4	27,7	18,9	14,6	1,8	27,4	1,9
Polietileno (SPo)	PA	16,1	46,2	17,2	18,3	14,6	3,3	27,6	2,5
Polietileno (SPo)	MO	16,6	40,7	4,2	18,1	12,8	10,7	27,6	2,7
Polietileno (SPo)	SP	17,3	41,4	5,8	18,0	11,1	9,5	27,6	2,0
Polietileno (SPo)	CO	13,5	57,4	29,2	18,0	15,2	2,7	27,5	2,5

Tabla 2. Datos característicos de los sistemas estudiados. Efecto de la tipología del pavimento y del sustrato.

Asimismo, la temperatura del elemento calefactor cambia significativamente en los diferentes suelos analizados, pasando de 40 °C en el corcho a 31,2 °C en

el suelo plastificado. En las condiciones de ensayo utilizadas se comprobó que la temperatura de elemento calefactor no es excesivamente elevada, siendo la temperatura máxima que puede soportar el elemento calefactor muy superior a la medida en los ensayos.

En estado estacionario, destaca que la temperatura media de la pieza es muy parecida para todos los sistemas estudiados. Junto con el suelo plastificado, los sistemas que usan el pavimento CT son los que presentan la temperatura de suelo más estable, aunque entre los suelos analizados las diferencias no son muy significativas. Por otra parte, la frecuencia de conexión/desconexión del sistema de control muestra variaciones significativas entre los diferentes sistemas analizados. Dicha frecuencia está relacionada con la inercia térmica que presenta el suelo, a igualdad de otros parámetros (como la configuración del propio controlador). La configuración estándar presenta una inercia térmica intermedia.



Figura 5. Foto general del montaje mostrando la diferencia de dimensiones entre la pieza de corcho y del sistema CT.

Finalmente, los valores de consumo eléctrico obtenidos muestran cierta variación, aunque es difícil establecer si esta variación es significativa dentro del error experimental de la medida. Hay básicamente dos factores que pueden introducir errores en el consumo medido: el hecho de que los suelos analizados no tenían todos exactamente el mismo formato (debido a que no fue posible cortar algunos de ellos), y los errores en la determinación del instante de la conexión y desconexión, que tenía una incertidumbre igual al intervalo de muestreo (10 s).

En la figura 5, se muestra la diferencia de dimensiones entre la pieza de corcho y el sistema CT.

En principio, según se ha comentado en el apartado 2, el consumo debería ser el mismo para todos los suelos analizados, cambiando únicamente los perfiles de temperatura y las frecuencias de conexión y desconexión. Un análisis más profundo indica que podría haber diferencias entre los diferentes suelos, pero éstas se deberían básicamente a la emisividad de la superficie externa del suelo o a un insuficiente aislamiento.

Para diferenciar entre los diferentes sistemas desde el punto de vista del consumo sería necesario mantener estrictamente constante el formato (tamaño) de los pavimentos y reducir el intervalo de muestro. En consecuencia, los ensayos presentados a continuación se realizaron con un intervalo de muestreo de 5 s.

4.1.2. Efecto del color del pavimento cerámico.

El color (claro u oscuro) de una baldosa influye en su absorptividad y podría afectar también a su emisividad. En consecuencia, el comportamiento de un sistema de suelo radiante podría ser diferente al cambiar el color del pavimento. Con el fin de evaluar dicho efecto se usó el prototipo diseñado para ensayar simultáneamente dos suelos diferentes: uno blanco y el otro negro.

Al comparar los resultados de los ensayos se observa que, en general, no existen casi diferencias entre el sistema formado por la baldosa clara y el formado por la baldosa oscura, aunque el tiempo de calentamiento inicial es algo más largo en el caso de la pieza oscura (tabla 3). Las pocas diferencias existentes entre los resultados obtenidos indican que los valores de emisividad son prácticamente iguales.

Ensayo	Color	Arranque			Estado estacionario				
		T_{amb} (°C)	T_{Max} (°C)	t_i (min)	T_{amb} (°C)	Q (W)	f (ciclos/h)	T_p (°C)	ΔT_p (°C)
A	Blanco	17,8	51,2	22,3	17,8	16,0	3,0	27,2	1,8
	Negro	17,8	50,6	24,5		16,6	3,1	27,6	1,6
B	Blanco	20,6	51,3	18,0	20,7	10,9	2,4	27,7	1,8
	Negro	20,6	50,0	16,5		10,3	2,5	27,5	1,8

Tabla 3. Datos característicos de los sistemas estudiados. Efecto del color del pavimento.

Cabe indicar que la emisividad puede ser muy diferente a la absorptividad; y esto se debe en parte a que cuando se habla de emisividad el "emisor" de radiación es la pieza, que se encuentra a una temperatura cercana al ambiente, y cuando hablamos de absorptividad nos solemos referir a la radiación solar recibida, en cuyo caso el "emisor" es el Sol. Las longitudes de onda de ambas radiaciones son muy diferentes, y el comportamiento de las piezas a ellas también. Una pieza clara y otra oscura situadas al Sol alcanzarán temperaturas muy distintas debido a la diferencia en absorptividad, aunque su emisividad sea idéntica.

En cambio, los resultados obtenidos muestran que el tiempo de arranque disminuye significativamente al aumentar la temperatura ambiente: al subir de 3 °C el ambiente, el tiempo de arranque baja el 25% aproximadamente. Asimismo existe una diferencia de consumo sustancial entre los dos ensayos realizados: una bajada de la temperatura ambiente de 3 °C corresponde a un aumento del consumo próximo al 50%. A la hora de comparar configuraciones diferentes, es importante verificar que las condiciones ambientales en las que realizan los ensayos son similares.

4.2. Sistema de control.

En esta segunda fase experimental se estudió el efecto del sistema de control sobre el comportamiento del sistema de calefacción por suelo radiante eléctrico CT. Como se ha mencionado, el elemento calefactor está regulado por un controlador de tipo todo/nada. En esta parte del trabajo, se realizaron ensayos usando la temperatura de la superficie superior de la pieza (control convencional) o del elemento calefactor como variable de control. Como se indica en la tabla 4, se realizaron 3 ensayos distintos. En el primero, se usó la temperatura de la pieza para controlar el sistema. Los dos últimos ensayos se realizaron usando la temperatura del elemento calefactor para controlar el sistema. El valor de control era de 29 °C o 35 °C. Este segundo valor corresponde a la temperatura media del elemento calefactor medida en el ensayo realizado con el control convencional.

Ensa- yo	Ubicación termopar control	T_{cons} (°C)	Estado estacionario				
			T_{amb} (°C)	Consumo (W)	f (ciclos/h)	T_p (°C)	ΔT_p (°C)
A	Pavimento	29	20,7	10,9	2,4	27,5	1,8
B	Elemento calefactor	29	21,4	4,4	29,3	25,0	0,2
C	Elemento calefactor	35	20,1	10,0	56.1	26,6	0,3

Tabla 4. Datos característicos de los sistemas estudiados. Efecto del sistema de control.

En los ensayos realizados con el sistema de control convencional, existe un periodo inicial de arranque en el que el elemento calefactor se calienta hasta que la pieza alcanza los 29 °C (figura 4). Por el contrario en el caso de los ensayos controlados por la temperatura del elemento calefactor, el suelo no alcanza la temperatura objetivo tras una hora de ensayo (esta temperatura objetivo es de 29 °C en el centro de la pieza, correspondientes a unos 27,5 °C en la posición del termopar). La baldosa se calienta progresivamente mientras la temperatura del elemento calefactor oscila ligeramente alrededor del valor de control. Tras una hora de ensayo la temperatura alcanzada por ambas baldosas es de unos 25 °C para una temperatura de consigna de 29 °C, y de unos 26 °C para el una temperatura de consigna de 35 °C (figura 6).

Por otra parte, el comportamiento del sistema en estado estacionario es claramente diferente según que el montaje está controlado por la temperatura del suelo o por la temperatura del elemento calefactor. En el primer caso, la temperatura del suelo va cambiando con el tiempo (figura 4). Las conexiones y desconexiones del elemento calefactor conducen a ciclos de calentamiento y enfriamiento que se traducen por unas oscilaciones del orden de 2 °C en la temperatura superficial de la baldosa. Al usar la temperatura del elemento calefactor como variable de control se consigue una temperatura muy estable en la superficie de la baldosa, aunque más baja que en el caso anterior (figura 6).

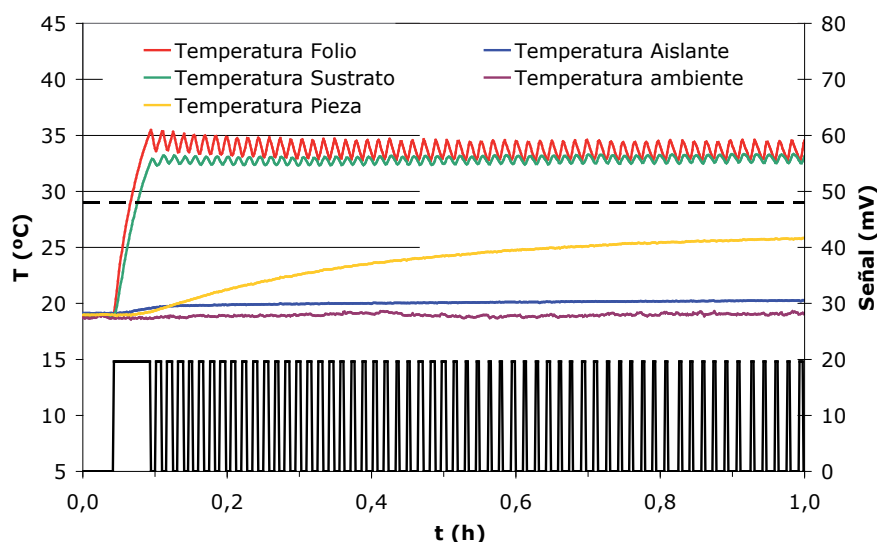


Figura 6. Distribución de temperaturas durante la primera hora de ensayo de un ensayo con control por la temperatura del elemento calefactor ($T_{cons}=35\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Asimismo, en el caso de los sistemas controlados por la temperatura del elemento calefactor, la frecuencia de conexión es mucho más elevada que para los ensayos realizados con el método de control convencional. El elemento calefactor se conecta durante periodos de tiempo muy cortos (del orden de 10 a 15 s) y parecidos al intervalo de muestro (5 s), lo que puede inducir un error considerable en los valores de consumo obtenidos. Al comparar los datos de consumo con los del sistema convencional, no se encuentran grandes diferencias entre el ensayo A y en el ensayo C. En cambio el consumo medido en el ensayo B es muy bajo; esto se puede explicar por una menor diferencia entre la temperatura de la baldosa y la del ambiente, comparada con la diferencia existente en los otros ensayos.

4.3. Capas inferiores.

En la tercera fase experimental se consideraron los efectos del espesor de aislante y del tipo de suelo sobre el comportamiento del suelo radiante, usando el prototipo para ensayar simultáneamente dos configuraciones de suelos radiantes: una con un aislante de 5 mm de espesor y la otra con un aislante de 20 mm. Los ensayos se realizaron colocando los prototipos sobre los dos tipos de suelo descritos en la tabla 5.

Suelo	Descripción del suelo (forjado)
Tipo 1	Suelo de sótano formado por baldosas cerámicas, solera de hormigón H-200, de 20 cm, lama de polietileno de 2 mm y encachado de bolos de 20 cm.
Tipo 2	Suelo de forjado formado por baldosas cerámicas, base de mortero de 5 cm, capa de desolidarización, nivelación y relleno de 3 cm, viguetas y bovedillas de 26 cm.

Tabla 5. Suelos empleados de soporte para el montaje de suelo radiante.

Como se ha comentado anteriormente, la temperatura ambiente influye de forma importante tanto en el tiempo de calentamiento inicial como en el consumo. Como consecuencia, se decidió aumentar la temperatura de consigna en algunos de los ensayos realizados para conseguir diferencias entre la temperatura de consigna (T_{cons}) y el ambiente parecidas y poder comparar los resultados obtenidos sobre un tipo de suelo con los obtenidos con el otro. Las condiciones de ensayo así como los resultados obtenidos se recogen en la tabla 6.

Suelo	Espesor aislante (mm)	T_{cons} (°C)	Arranque			Estado estacionario				
			T_{amb} (°C)	T_{Max} (°C)	t_i (min)	T_{amb} (°C)	Q (W)	f (ciclos/h)	T_p (°C)	ΔT_p (°C)
Tipo 1	20	29	15,8	49,8	30	18,0	15,4	3,0	24,1	1,8
	5			44,7	41		21,5	3,4	26,5	1,5
	20	32	22,8	51,0	16	21,5	12,0	2,8	31,5	1,8
	5			47,6	23		20,2	3,3	30,6	1,6
Tipo 2	20	29	20,4	47,5	19	20,0	15,6	3,0	28,3	1,7
	5			41,2	19		16,5	3,3	27,0	1,4
	20	34	24,0	54,3	25	26,0	12,8	2,8	32,5	1,9
	5			47,9	28		16,5	3,2	32,3	1,5

Tabla 6. Datos característicos de los sistemas CT estudiados.
Efecto del espesor de aislante y del tipo de forjado.

Los resultados obtenidos en esta parte del estudio no se pueden interpretar de forma inmediata ya que el tiempo de arranque y el consumo dependen tanto del espesor de aislante y del tipo de suelo como de la diferencia entre la temperatura de consigna y el ambiente. Para identificar cuales de los tres factores anteriores influyen de forma significativa sobre estas variables se decidió ajustar los resultados, suponiendo dependen de forma lineal de todas las variables y usando las ecuaciones siguientes:

$$t_i = b_0 + b_1 \cdot \Delta T^* + b_2 \cdot A + b_3 \cdot S$$

Ecuación 2.

$$Q = c_0 + c_1 \cdot \Delta T^* + c_2 \cdot A + c_3 \cdot S$$

Ecuación 3.

Donde:

t_i : Tiempo de calentamiento inicial (min).

Q : Consumo eléctrico (W).

ΔT^* : Diferencia entre la temperatura de consigna y el ambiente ($^{\circ}\text{C}$).

A: Espesor del aislante (mm).

S: Parámetro función del tipo de suelo: $S=0$ si para el suelo de tipo 1 y $S=1$ para el suelo de tipo 2.

b_n, c_n : Parámetros de ajuste.

Los parámetros b_n y c_n se determinaron utilizando el método de los mínimos cuadrados, calculando el valor del error estadístico (desviación típica) sobre cada uno de ellos. Un valor elevado de este error frente al valor del coeficiente significa que la variable correspondiente afecta poco al tiempo de calentamiento. En cambio, un error pequeño indica que la variable influye de forma significativa.

	$t_i = b_0 + b_1 \cdot \Delta T^* + b_2 \cdot A + b_3 \cdot S$				$Q = c_0 + c_1 \cdot \Delta T^* + c_2 \cdot A + c_3 \cdot S$			
Parámetro	b_0	b_1	b_2	b_3	c_0	c_1	c_2	c_3
Valor	-4,56	3,32	0,28	0,24	10,28	1,17	-0,31	-0,31
Error estadístico	6,48	0,57	0,13	2,05	6,68	0,64	0,08	1,49
Error relativo	-	17%	45%	600%	-	55%	25%	500%

Tabla 7. Parámetros de ajuste de los valores de tiempo de arranque.

La tabla 7 contiene los parámetros de ajuste de la ecuación 1 y el error correspondiente a cada uno. A la vista de estos resultados, se puede comprobar que la diferencia entre la temperatura de consigna y el ambiente así como el espesor de aislante son las variables con más influencia sobre el comportamiento del suelo radiante. Al aumentar el espesor del aislante, el sistema CT se calienta de forma más rápida y se consigue reducir el consumo como consecuencia de las menores pérdidas de calor por la parte inferior del sistema de calefacción por suelo radiante. Finalmente, cabe destacar que el tipo de forjado no influye de forma significativa sobre el tiempo de calentamiento o el consumo, como indican los valores de error muy elevados sobre los parámetros correspondientes (b_3, c_3).

5. CONCLUSIONES

- A nivel teórico, los cálculos térmicos realizados con un suelo formado por el sistema CIVIS' TERMIA® [CT] (Drysystem adaptado + sustrato de polietileno + elemento calefactor + aislante de poliestireno) indican que la mayor resistencia al flujo de calor se sitúa en el soporte plástico del Drysystem adaptado. Sin embargo, la temperatura que alcanza el elemento calefactor no es muy alta, lo que hace que el sistema pueda cumplir perfectamente su función como suelo radiante.

- La influencia de cada una de las capas sobre el comportamiento del sistema de suelo radiante CT se ha evaluado experimentalmente usando un prototipo diseñado especialmente para este estudio. Al cambiar la tipología de suelo, el tiempo de calentamiento inicial y la temperatura del elemento calefactor cambian significativamente. Sin embargo, en ninguno de los suelos analizados la temperatura de elemento calefactor es excesivamente elevada. Por otra parte destaca que, junto con el suelo plastificado, los sistemas que usan el sistema CT son los que presentan la temperatura de suelo más estable.
- Los estudios de tiempo de calentamiento necesario para llegar a una temperatura superficial estacionaria y la frecuencia de conexión y desconexión del elemento calefactor, indican que el sistema presenta una significativa capacidad de acumulación de calor comparada con otros sistemas estudiados, comportándose como un sistema radiante semi-acumulador.
- Al cambiar el tono del pavimento cerámico, no se modifica el comportamiento del sistema CT de calefacción por suelo radiante. En cambio, la temperatura ambiente influye de forma importante tanto en estado estacionario como durante el calentamiento inicial.
- En la configuración estándar, el elemento calefactor está regulado por un controlador de tipo todo o nada, usando la temperatura de la superficie superior de la pieza como variable de control. Se han realizado ensayos usando como temperatura de control la del elemento calefactor; con ello se consigue eliminar las oscilaciones en la temperatura superficial del suelo, pero el tiempo de repuesta inicial del sistema es mucho mas lento y hace falta más de 1 hora para alcanzar el estado pseudo-estacionario, con una temperatura superficial estable. Este cambio en el sistema de control no supone ninguna modificación sustancial en el consumo energético del sistema.
- Finalmente, se ha comprobado que, en las mismas condiciones de temperatura ambiente y para una misma temperatura de consigna, aumentar el espesor de aislante permite reducir el tiempo de calentamiento inicial del sistema CT y reducir el consumo eléctrico. Por el contrario el comportamiento del sistema de suelo radiante es independiente del tipo de suelo sobre el que está instalado.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] OLESEN, BW. Radiant floor heating in theory and practice. Ashrae J., 44(7), 19-24, 2002.
- [2] BOZKIR, O.; CANBAZOGLU, S. Unsteady performance analysis of a room with serial and parallel duct radiant floor heating system using hot airflow. Energy Build., 36(6), 579-586, 2004.

- [3] SATTARI, S.; FARHANIEH, B. A parametric study on radiant floor heating system performance. *Renew. Energy*, 31(10), 1617-1626, 2006.
- [4] DORMEAU, J.P.; GONORD, M. Le plancher rayonnant électrique. *Chaud Froid Plomb.*, 570, 63-70, 1995.
- [5] JOHNSON, C.; ECCLES, R. Acute cooling of the feet and the onset of common cold symptoms. *Fam. Pract.*, 22(6), 608-613, 2005.
- [6] UNE-EN 1264-2:2009. Sistemas de calefacción y refrigeración de circulación de agua integrados en superficies. Parte 2: Suelo radiante: Métodos para la determinación de la emisión térmica de los suelos radiantes por cálculo y ensayo.