

MONITORIZACIÓN DE SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS CERÁMICAS PARA LA REHABILITACIÓN DE CUBIERTAS PLANAS

Corrales, J.⁽¹⁾, C. Segarra⁽¹⁾, J. Mira ⁽¹⁾, L. Vilalta⁽¹⁾, J.I. Cantero⁽¹⁾, A. Pitarch⁽²⁾,
L. Reig⁽²⁾, M.J. Ruá⁽²⁾

⁽¹⁾ Instituto de Tecnología Cerámica (ITC). Asociación de Investigación de las Industrias Cerámicas (AICE) - Universitat Jaume I. Castellón. España.

⁽²⁾ Departamento de Ingeniería Mecánica y Construcción - Grupo de investigación TECASOS. Universitat Jaume I. Castellón. España.

1. RESUMEN

Uno de los aspectos más importantes para mejorar la prestación de los edificios en materia de demanda energética y de emisiones de Gases de Efecto Invernadero es la **rehabilitación de la envolvente térmica**. Las fachadas y cubiertas son los elementos constructivos que protegen los espacios habitables del exterior y su influencia en el comportamiento energético de los edificios es relevante.

En este contexto se plantea el **proyecto ROOFTILES II**, cuyo objetivo principal se centra en la **monitorización y evaluación de sistemas cerámicos dirigidos a la rehabilitación de cubiertas planas** que contribuyan a mejorar la eficiencia energética y sostenibilidad de los edificios. Entre los objetivos específicos del proyecto, destacan:

- Análisis y selección de los sistemas cerámicos convencionales e innovadores a evaluar en la rehabilitación de cubiertas planas.
- Diseño, desarrollo y construcción de prototipos de validación acondicionados que permitan monitorizar simultáneamente varios sistemas cerámicos.
- Seguimiento y actualización del sistema de monitorización y visualización de los datos experimentales obtenidos en los prototipos.
- Análisis de resultados y evaluación de la aplicación de los diferentes sistemas cerámicos para la rehabilitación de cubiertas, durante periodos fríos y cálidos. Se analizarán los resultados obtenidos respecto a una solución de referencia representativa de las cubiertas de los años 60-80.

La presente comunicación presentará los resultados principales obtenidos en el proyecto "Estudio de monitorización de soluciones constructivas horizontales cerámicas para su evaluación energética (ROOFTILES y ROOFTILES II)", referencias (IMDEEA/2021/34 y IMDEEA/2022/7). Este proyecto cuenta con el apoyo del Instituto Valenciano de Competitividad Empresarial (IVACE) a través de los Fondos Europeos de Desarrollo Regional (FEDER).

2. INTRODUCCIÓN

El sector de la construcción representa en Europa el 40% del consumo total de energía, produce un 36% de las emisiones de CO₂, es el responsable de un tercio del consumo de agua y de un tercio del total de los residuos generados.

La Unión Europea (UE), a través de las directivas de rendimiento energético de los edificios, tiene como **objetivo la reducción del consumo de energía en el sector de edificación** y, en consecuencia, la reducción de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) para la mitigación del cambio climático. El reto global frente al cambio climático y la sostenibilidad pasa por una transformación de nuestra manera de construir y, especialmente, de nuestro parque edificado: aproximadamente el 75% del **parque edificatorio** de la UE es **ineficiente** desde el punto de vista energético.

A **nivel nacional**, el parque edificatorio comprende más 10 millones de edificios y supera los 25 millones de viviendas. Aproximadamente el 90% de estos edificios fueron construidos antes de la entrada en vigor del Código Técnico de la Edificación (CTE)¹ y el 60% de las viviendas se construyeron **sin ninguna normativa de eficiencia** energética (anteriores a la norma NBE-CT 79)². La rehabilitación energética del parque edificatorio se convierte en una prioridad clave para lograr los objetivos de descarbonización del sector marcados desde la UE para 2050 (Pacto Verde Europeo)³.

En este sentido, la **envolvente de los edificios** (fachadas y cubiertas) desempeñan un papel notable en la transferencia de calor entre el exterior y en el interior del edificio. En concreto, **la cubierta** es el elemento constructivo de la envolvente que mayor incidencia de radiación solar recibe a lo largo del día y su influencia en el comportamiento térmico del edificio es relevante.

Todo esto enmarcado en un contexto global de cambio climático donde, por citar un ejemplo, el año 2022 batió todos los récords en cuanto a días en ola de calor registrados en la península (según AEMET)⁴. Este nuevo escenario al que nos enfrentamos requiere el planteamiento de sistemas para la rehabilitación que mejoren el comportamiento de los edificios frente a altas temperaturas y episodios de clima extremos.

¹ Código Técnico de la Edificación (CTE), 2006. Disponible: <https://www.codigotecnico.org/>

² Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDEA). *Rehabilitación energética: una prioridad y una oportunidad para todos*. Disponible: <https://www.idae.es/rehabilitacion-energetica-una-prioridad-y-una-oportunidad-para-todos>

³ Consejo Europeo, 2023. *Pacto verde europeo*. Disponible: <https://www.consilium.europa.eu/es/policies/green-deal/>

⁴ AEMET, 2022. *Olas de calor en España desde 1975*. Área de Climatología y Aplicaciones Operativas. Disponible: https://www.aemet.es/documentos/es/conocermas/recursos_en_linea/publicaciones_y_estudios/estudios/Olas_calor/Olas_Calor_ActualizacionOctubre2022.pdf

3. SISTEMAS PARA LA REHABILITACIÓN ENERGÉTICA

3.1 ESTUDIO DE SISTEMAS Y LIMITACIONES EN LA REHABILITACIÓN

En la primera fase del proyecto se analizaron las tipologías de cubiertas de los edificios existentes y varios sistemas para la rehabilitación de cubiertas planas: suelo técnico elevado, pavimento adherido, pavimento permeable, para cubiertas transitables, y, acabado de grava y cubierta ajardinada para cubiertas no transitable. Se evaluaron todas ellas en base a criterios ambientales (A), económicos (E) y prestacionales (P), mediante indicadores, como se observa en la Tabla 1, donde las valoraciones podían variar entre 1 y 5 desde la más desfavorable hasta la más favorable.

Criterios evaluados	Suelo técnico elevado	Pavimento adherido	Permeable	Grava	Ajardinada
A1. Aislamiento térmico – Ahorro de energía	5	4,93	4,98	4,93	4,91
A2. Recuperación - Reciclaje	5	1	5	5	4
E1. Coste inversión inicial	3,21	3,43	5	4,87	3,14
E2. Mantenimiento (durabilidad-coste-periodicidad)	5	3	5	5	3
P1. Facilidad ejecución	4	3	4	5	1
P2. Aislamiento acústico	4	4	4	4	5
P3. Peso del sistema	1,3	0,9	1,13	5	0,33
P4. Impermeabilización-Estanquidad	5	5	5	5	5
P5. Estética	4	4	4	3	5
Valores promedio (sin ponderar)	4,06	3,25	4,23	4,64	3,49

Tabla 1. Valoración de los criterios para las soluciones definidas

A efectos de priorización, se concluyó que el mayor número de criterios favorables correspondía a la solución de acabado con grava, seguida del pavimento permeable, el suelo técnico elevado y la de pavimento adherido. La cubierta verde era la que presentaba un mayor número de criterios desfavorables, resultando especialmente importante el peso de este sistema en rehabilitación, factor que prácticamente hacía inviable su aplicación.

Con los resultados de este estudio y tras la realización de encuestas a usuarios clave, se identificaron una serie de **limitaciones** a tener en cuenta a la hora de abordar la rehabilitación de cubiertas planas, entre las que destacan:

- El **sobrepeso** de las soluciones de rehabilitación en cubiertas es de gran **importancia** y condiciona su aplicación. Sin embargo, su importancia no es percibida como tal por usuarios y expertos.
- Pese a que la cubierta **ajardinada** es muy aconsejable desde el punto de vista de la **sostenibilidad**, difícilmente será aplicable como solución de rehabilitación en edificios existentes **por su sobrepeso**.
- Los **usuarios** confieren **mayor importancia al coste de la inversión**, siendo un factor que, en ocasiones, determina la viabilidad de la rehabilitación.

- A pesar de la importancia de aislar térmicamente la envolvente térmica del edificio, la **normativa actual (DB HE1)** solo es de aplicación en determinados supuestos de rehabilitación.
- Las actuales **herramientas de simulación** no contemplan algunos de los efectos beneficiosos de las soluciones de rehabilitación innovadoras, tales como la ventilación en suelos técnicos elevados, la reflectancia de los materiales de acabado, o la evapotranspiración de las cubiertas vegetales.

3.1.1. SELECCIÓN DE SISTEMAS CERÁMICOS A EVALUAR EXPERIMENTALMENTE

Una vez analizados los diferentes sistemas para rehabilitación, se han seleccionado **dos sistemas cerámicos** para su monitorización y evaluación experimental (Ilustración 1):

- Cubierta invertida con **Pavimento Aplacado cerámico (PA)**. Se trata de una solución en la que el aislante térmico se instala por encima de la lámina de impermeabilización para protegerla frente a solicitaciones externas.
- Cubierta invertida con **Suelo Técnico Elevado (STE)**. Se trata de una solución constructiva similar a la anterior, que se caracteriza por la colocación de las baldosas sobre unos soportes que permiten la disposición de una cámara ventilada.

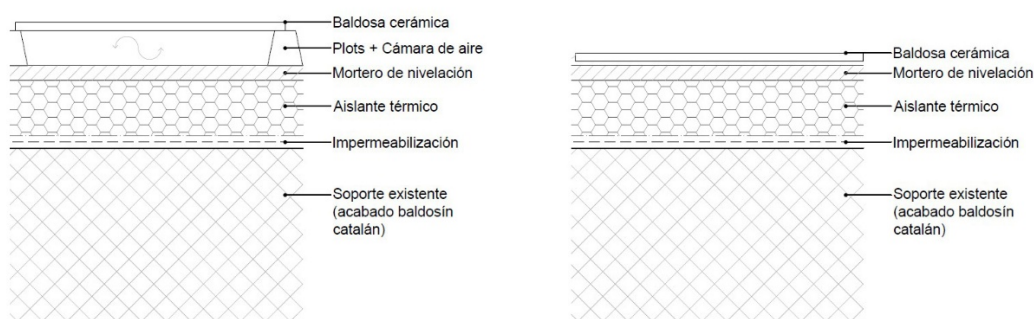


Ilustración 1. Esquema con las distintas capas que conforman los sistemas de cubierta. Izquierda (Cubierta con suelo técnico elevado cerámico). Derecha (Cubierta con aplacado cerámico)

En la Tabla 2 se muestran las principales variables de los sistemas cerámicos a evaluar experimentalmente durante el periodo de monitorización. Para identificar las variables se ha empleado la codificación que se muestra entre paréntesis:

Sistemas de cubierta	Color piezas	Espesor piezas (mm)	Apertura cámara	Altura cámara (mm)	Espesor Aislamiento térmico (mm)
Pavimento Aplacado (PA)	Blanco (b) Blanco reflectivo (bR)	12 8 6	-	-	Sin aislante (A0) 30 (A3) 50 (A5)
Suelo Técnico Elevado (STE)	Gris (g) Negro (n)	12 8 6 6+núcleo (R)	Cerrado (cc) Semi-abierto (csa) Abierto (ca)	20 (2) 50 (5)	Sin aislante (A0) 50 (A5) 80 (A8)

Tabla 2. Variables de las piezas cerámicas y sistemas evaluados

Por ejemplo, el sistema codificado como “**STEn6cc2A5**”, correspondería a: sistema de cubierta de suelo técnico elevado, con pieza negra de 6mm de espesor, cámara de aire cerrada de 20mm de altura y aislamiento térmico de 50mm de espesor.

3.2 POTENCIAL AHORRO ENERGÉTICO ESTIMADO

Paralelamente al análisis experimental, se ha llevado a cabo un estudio de simulación termodinámica paramétrica para la rehabilitación de **tres tipologías** de edificios residenciales (unifamiliar, plurifamiliar bajo, plurifamiliar alto), en **tres zonas climáticas** distintas de España (Sevilla-A4, Castellón-B3, Burgos-E1), modificando las siguientes variables: orientación de las fachadas y color de la envolvente. Además, se han considerado dos escenarios de rehabilitación, uno en el que se rehabilita únicamente la cubierta y otro en el que se rehabilita toda la envolvente (cubierta, fachadas y carpintería exterior).

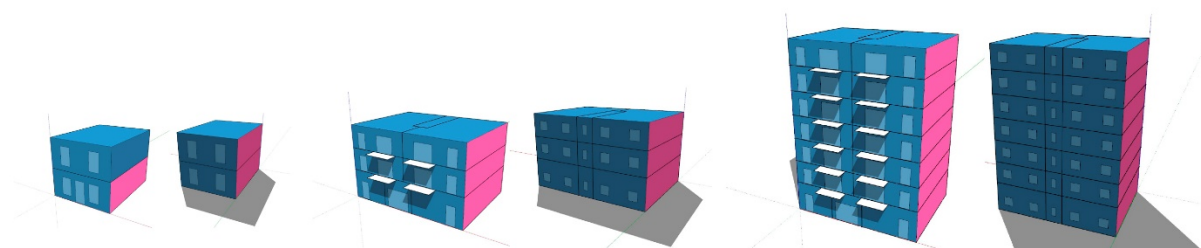


Ilustración 2. Modelos térmicos de simulación de las tipologías edificatorias. Izquierda (Residencial Unifamiliar-RU), centro (Residencial Plurifamiliar Bajo- RPB), derecha (Residencial Plurifamiliar Alto- RPA)

Debido a la extensión del estudio, en este punto nos centraremos únicamente en el escenario de **rehabilitación** de la **cubierta**, considerando la fachada principal con orientación **sur** y el color de la envolvente del edificio sin rehabilitar con una **absortancia de 0,5** (color medio). En la Tabla 3 se recogen los valores de transmitancia térmica considerados para la simulación:

Características térmicas de los cerramientos opacos	Edificio sin rehabilitar 1980 (W/m²K)			Edificio Rehabilitación cubierta (W/m²K)		
	A4	B3	E1	A4	B3	E1
Cubiertas en contacto con aire exterior	1,79			0,44	0,33	0,19
Muros en contacto con aire exterior	1,33					

Tabla 3. Valores de transmitancia del edificio original y del rehabilitado (según Anejo E del Documento Básico de Ahorro de Energía DB-HE del CTE).

En la Tabla 4 se presentan los resultados obtenidos para este caso. Se muestran, por una parte, los valores de demanda energética de los edificios sin rehabilitar (kWh/m²) en las diferentes zonas climáticas y por otra, los porcentajes de variación de la demanda energética (%) que se pueden alcanzar en cada caso mediante la rehabilitación de la cubierta. Se ha considerado que la rehabilitación de la cubierta en zonas climáticas cálidas se realiza con piezas claras y en zonas climáticas frías con piezas oscuras.

Zona climática	Tipología Edificatoria	Demanda energética Edificio sin rehabilitar (kWh/m ²)			Color cubierta rehabilitada (Absortancia)	Variación Demanda energética Cubierta rehabilitada (%)		
		Calefacción	Refrigeración	Total		Calefacción	Refrigeración	Total
A4	RU	15,1	35,8	51	Claro (0,3)	-15%	-32%	-27%
	RPB	9,6	29,4	39		-54%	-26%	-33%
	RPA	3,4	25,8	29,3		-37%	-16%	-19%
B3	RU	28,1	22,4	50,5	Claro (0,3)	-16%	-37%	-26%
	RPB	19,6	18,2	37,8		-49%	-30%	-40%
	RPA	8	16,2	24,2		-30%	-19%	-22%
E1	RU	149,1	2,1	151,2	Oscuro (0,7)	-29%	+16%	-28%
	RPB	119,8	1,6	121,4		-42%	+21%	-41%
	RPA	73,1	1,7	74,8		-25%	+28%	-24%

Tabla 4. Variación demandas energéticas en rehabilitación, en función de la zona climática, la tipología edificatoria y el color de la envolvente

Como cabría esperar, en los edificios sin rehabilitar con una envolvente de los años 80, las demandas de calefacción y refrigeración por metro cuadrado son menores en las tipologías edificatorias en altura (RPA, RPB), al tratarse de edificios más compactos, con menor relación entre la superficie de envolvente y la superficie construida.

Al comparar los resultados obtenidos en las distintas zonas climáticas para las diferentes tipologías edificatorias, se puede observar el **potencial de ahorro energético** que supondría la rehabilitación de la cubierta del edificio, que permite alcanzar **reducciones de la demanda global** que varían entre el **19% y el 41%**.

Si nos centramos en las **demandas de calefacción**, se alcanzan reducciones en todos los casos, con valores comprendidos entre el **16% y el 54%**, mientras que, en el caso de las **demandas de refrigeración**, se observan mejoras que pueden alcanzar el **37%** en zonas **climáticas cálidas (A4, B3)**.

Cabe destacar que, en **zonas climáticas frías (E1)**, se observan incrementos de demanda de refrigeración próximos al 30%. Estos incrementos pueden deberse principalmente a la influencia del color de la envolvente y al efecto del aislamiento que reduce las pérdidas de calor del interior al exterior durante la noche. Como se observa en los resultados de demanda global, la influencia de este incremento es mínima, ya que los valores de refrigeración son muy bajos respecto a los de calefacción.

Por otra parte, tras el análisis de los resultados obtenidos en las simulaciones, considerando todos los escenarios y variables, se ha observado que:

- Cuando se rehabilita **toda la envolvente** (cubierta+fachada+ventanas), pueden alcanzarse valores de reducción de la **demanda global** próximos al **70%** en zonas climáticas frías (E1) y al **50%** en zonas climáticas cálidas (B3-A4).
- Además, se ha detectado que, en determinados casos, la rehabilitación de la envolvente con aislamiento térmico puede llegar a producir incrementos de la demanda de refrigeración, tanto en zonas climáticas cálidas como en frías. Para lograr un comportamiento energético eficiente en la rehabilitación, la **incorporación del aislamiento** térmico en la envolvente **debe ir acompañado de otras medidas**, como pueden ser los sistemas de protección solar (principalmente en zonas climáticas cálidas) y los sistemas de ventilación mediante recuperadores de calor que garanticen las renovaciones de aire en el interior de los edificios.

4. DESARROLLO Y VALIDACIÓN DE PROTOTIPOS

4.1. DISEÑO, DESARROLLO Y CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPOS

Para llevar a cabo el análisis experimental se han diseñado y construido **tres prototipos** de validación a modo de **laboratorio energético**, completamente **sensorizados y climatizados** que permiten la integración de distintas soluciones constructivas cerámicas en cubiertas planas. Ambos prototipos representan una cubierta transitable de los años 80 con baldosín catalán como material de acabado y una transmitancia térmica $U=1,79 \text{ W/m}^2\text{K}$.

En uno de los prototipos se ha analizado cómo se comporta una cubierta tipo (**REFERENCIA**) de un edificio existente (sin rehabilitar y sin aislamiento térmico), con baldosín catalán como material de acabado. Mientras que en los otros dos prototipos se han instalado diferentes sistemas cerámicos para rehabilitación. De esta forma, podemos monitorizar y visualizar de forma simultánea y en las mismas condiciones ambientales (temperatura, radiación, viento, etc.), el comportamiento de las diferentes soluciones de rehabilitación, tanto en periodos fríos como en periodos cálidos.

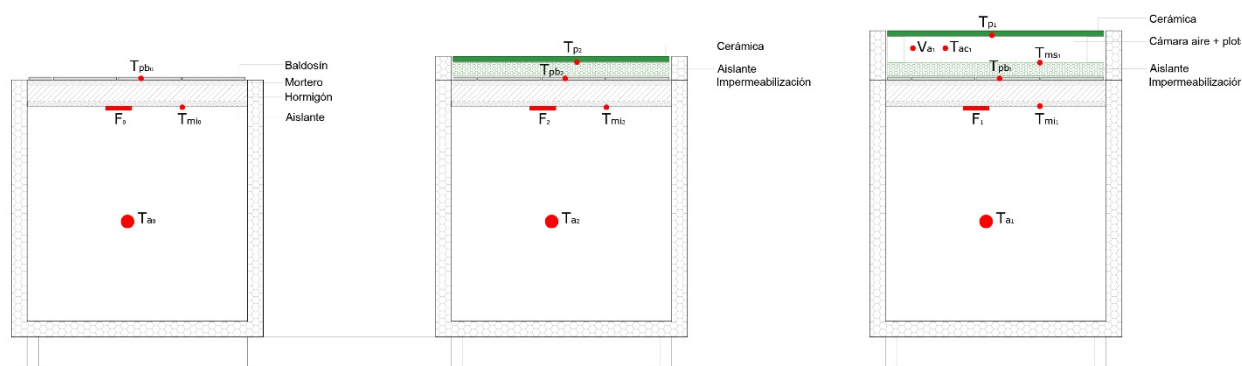


Ilustración 3. Prototipo de REFERENCIA (REF) izquierda. Prototipos rehabilitados (A) derecha y (B) centro.

A continuación, se muestran varias imágenes de los prototipos instalados en la azotea del Instituto de Tecnología Cerámica (ITC).



Ilustración 4. Prototipos operativos en la cubierta del ITC

4.2. MONITORIZACIÓN DE LOS PROTOTIPOS

Para llevar a cabo la monitorización de los prototipos, se ha implementado un sistema de adquisición de datos (basado en módulos ADAM) que permite recoger los valores generados por los sensores instalados en cada uno de los prototipos.

Las principales variables de temperatura recopiladas para cada uno de los prototipos han sido: Baldosín (Tp), Pieza cerámica superior (Tps), Muro interior (Tmi), Muro superior (Tms), Aire interior del prototipo (Tai), aire en la cámara del suelo técnico elevado (Tac). Además, también se han instalado sensores de flujo de calor en el interior de los muros de cada prototipo. Por otra parte, se han recopilado las variables relacionadas con las condiciones ambientales (Temperatura ambiente, radiación, velocidad y dirección de viento).

Para la visualización y análisis de los datos obtenidos en los prototipos, se ha implementado una plataforma (Thingsboard) que permite realizar un seguimiento del comportamiento de los sistemas en tiempo real a través del desarrollo de *dashboards* personalizados, tal y como se muestra en la Ilustración 5.

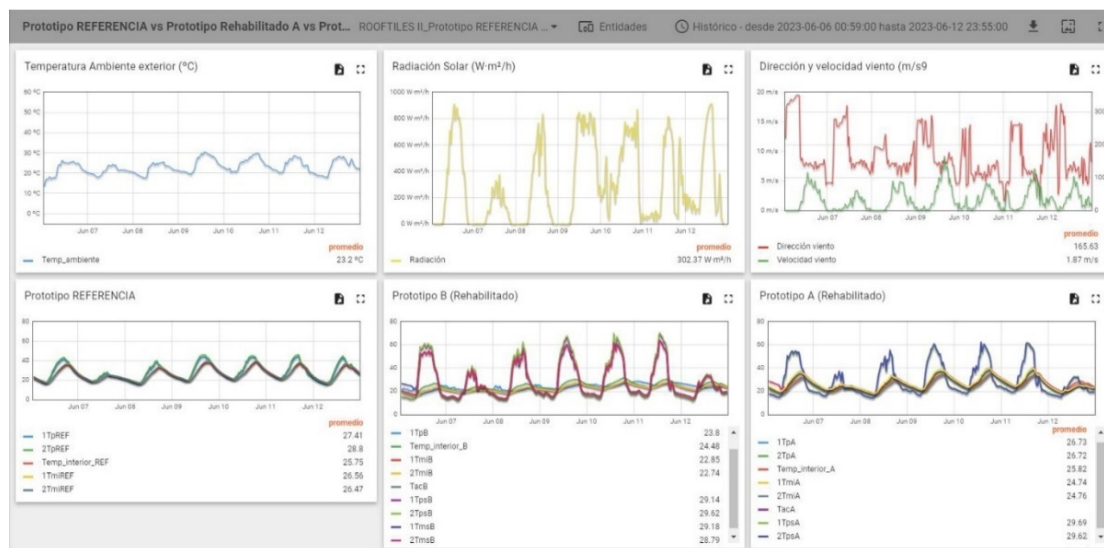


Ilustración 5. Plataforma visualización de datos durante periodo de monitorización (Dashboard)

5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Tras la monitorización durante el periodo de estudio, se ha procedido a evaluar resultados realizando un análisis comparativo entre los distintos sistemas de aquellas variables que afectan a la transferencia de calor a través de la cubierta.

5.1. REFERENCIA VS SUELO TÉCNICO ELEVADO

En primer lugar, se evaluó térmicamente el comportamiento del sistema para rehabilitación de suelo técnico elevado (**STE**) con pieza cerámica de 6 mm de espesor de color negra (n6) o blanca (b6), con la cámara cerrada (cc) y con dos espesores de aislamiento, sin aislante (A0) y con 5 cm de aislamiento (A5), respecto al sistema sin rehabilitar de referencia (REF: Baldosín).

De entre todas las variables analizadas experimentalmente, las tablas 5 y 6 muestran los valores durante el periodo diurno de: temperatura ambiente y radiación solar, temperatura de pieza superior (promedio y máximo), temperatura de muro interior y temperatura del aire interior. Además, se incluye la diferencia de la temperatura del muro en los prototipos rehabilitados respecto al sistema sin rehabilitar (REF: Baldosín).

EFFECTO AISLANTE

Para analizar el efecto del aislante se han comparado los valores promedios de días **soleados** para los sistemas del grupo (**1.5** y **1.7**) en clima templado (T) y Cálido (C), considerando tres variables de aislamiento: sin aislante (A0), con 50mm (A5) y con 80mm de aislamiento (A8), tal y como se recoge en la Tabla 5.

Se observa que, tanto en climas templados como en cálidos cuando se rehabilita con el sistema STE (con o sin aislante), aunque la temperatura en la superficie de las piezas cerámicas negras es mayor que la del baldosín, las **temperaturas en el muro interior son menores** respecto a la registrada en el prototipo de referencia debido a la reducción de las ganancias por radiación solar producidos por el efecto de la cámara ventilada y el aislante. En **climas templados** se observan diferencias de temperatura en el muro del orden de 1°C cuando se pasa de un sistema sin aislante respecto a un sistema con 50mm de aislamiento (1.5), pero apenas se aprecian diferencias cuando se pasa de 50mm a 80mm de aislamiento (1.7).

Grupo	Prototipo	Sistema	DÍA						
			Radiación media (W/m ²)	Tambiente media (°C)	TPieza media (°C)	TPieza máx. (°C)	Tcanal media (°C)	T muro media (°C)	Dif. muro Trehab-Tref (°C)
1.5 Templado	REF	Baldosín	421	21.8	23.1	30.6	-	21.2	-
	A	STEn6cc2A0			33.3	49.2	24.9	20	-1.3
	B	STEn6cc2A5			35.4	54.0	32.5	19.1	-2.2
1.7 Templado	REF	Baldosín	442	18.6	21.8	29.9	-	19.7	-
	A	STEn6cc2A5			32.6	53.6	29.3	17.0	-2.7
	B	STEn6cc2A8			33.5	54.6	30.4	17.2	-2.5
1.5 Cálido	REF	Baldosín	501	25.3	31.2	41.4	-	28.4	-
	A	STEn6cc2A0			38.6	59.2	31.9	25.6	-2.7
	B	STEn6cc2A5			40.8	66.6	39.0	23.0	-5.4

Tabla 5. Comparativa de temperaturas diurnas en STE con diferente espesor de aislante

En **clima cálido (1.5C)** las **reducciones de temperatura en el muro interior** del sistema STE con 50mm de aislamiento respecto al de referencia son importantes, alcanzando valores **superiores a 5°C**. En este caso, los valores de diferencia negativos indican que la temperatura en el muro de los sistemas rehabilitados se encuentra por debajo de las del prototipo sin rehabilitar (REF) debido a la reducción de la ganancia de calor que proporciona el sistema STE con aislante. Estas reducciones de ganancias térmicas diurnas favorecen la reducción de la demanda en refrigeración en clima cálido.

EFFECTO COLOR

Como puede observarse la Tabla 6, en **clima templado (1.6T)** la pieza de color negro absorbe más radiación y alcanza una temperatura mayor que la de referencia (12°C de promedio y 24°C en pico máximo), pero el efecto de la cámara del STE y el aislante reduce considerablemente la transmisión de calor, siendo finalmente la temperatura del muro **inferior** a la del muro sin rehabilitar (REF). La diferencia de temperatura en el muro entre los dos sistemas rehabilitados con piezas de diferente color es de 1°C, alcanzándose mayor temperatura en el muro cuando se rehabilita con pieza oscura.

Grupo	Prototipo	Sistema	DÍA						
			Radiación media (W/m ²)	Tambiente media (°C)	TPieza media (°C)	Tpieza máx. (°C)	Tcanal media (°C)	T muro media (°C)	Dif. muro Trehab-Tref (°C)
1.6 Templado	REF	(Baldosín)	446	19.3	21.8	30.1	-	19.6	-
	A	STEn6cc2A5			33.9	53.9	30.7	16.7	-2.8
	B	STEb6cc2A5			16.4	23.7	16.6	15.7	-3.9
1.6 Cálido	REF	(Baldosín)	473	28.2	35.9	45.7		33.7	-
	A	STEn6cc2A5			45.1	66.6	42.9	28.9	-4.8
	B	STEb6cc2A5			28.6	37.0	29.3	28.0	-5.7

Tabla 6. Comparativa de temperaturas promedio diurnas en STE con pieza negra y blanca

En el **clima cálido (1.6C)** se observa la misma tendencia, es en el prototipo rehabilitado con STE con pieza blanca donde se consigue mayor amortiguación y se alcanza menores temperaturas en pieza, canal y muro interior. Como se observa en el gráfico, Figura 2, aunque las diferencias de temperatura entre las piezas negra y blanca son muy significativas, las diferencias en la temperatura de muro en el sistema STE apenas presentan diferencias debido al efecto del aislamiento. Si se comparan las diferencias de temperatura entre el muro de referencia y el rehabilitado al final del día, se observa como en el prototipo sin rehabilitar la temperatura del muro (1TmiREF) está casi 12°C por encima de la del muro rehabilitado (1TmiA y 1TmiB).

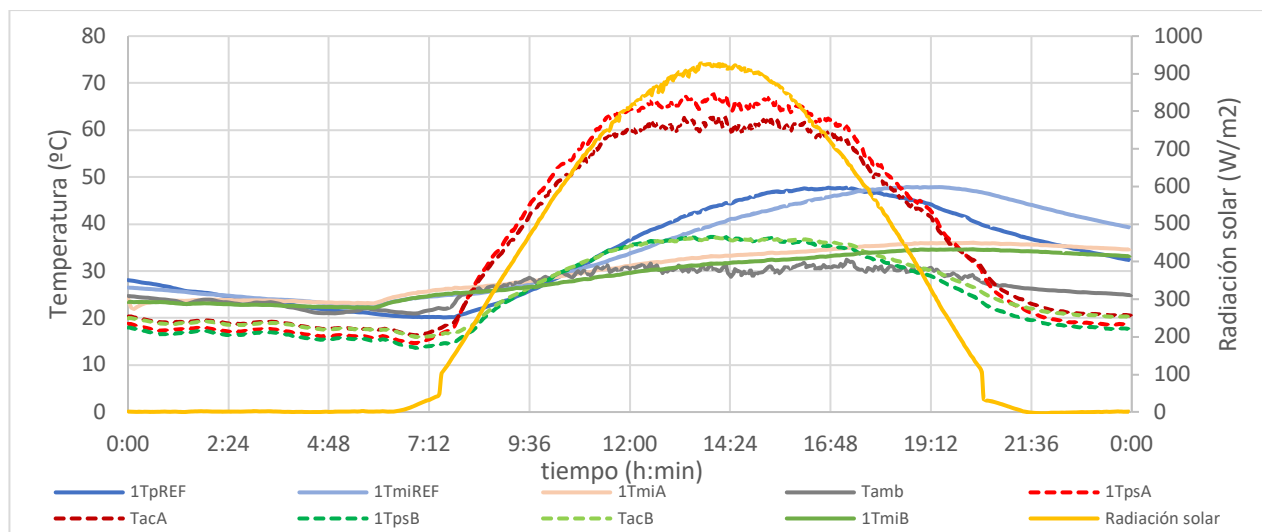


Figura 2. SISTEMA 1.6C: Prototipo REF / Prototipo A (STEn6cc2A5) / Prototipo B (STEb6cc2A5) 24-06-2023

5.2. REFERENCIA VS SISTEMA APLACADO VS SUELO TÉCNICO ELEVADO

Por otra parte, se evaluó el comportamiento del sistema para rehabilitación de suelo técnico elevado (**STE**) junto con el sistema de pavimento aplacado (**PA**) ambos con pieza cerámica de 6 mm de espesor de color negra (n6) o blanca (b6), y con 5 cm de aislamiento (A5).

Si se compara el sistema PA con el STE en **periodo templado** con **pieza negra** (2.1T) se observa como el sistema STE presenta una temperatura promedio en el muro casi un grado mayor que cuando se rehabilita el pavimento aplacado, Tabla 7, debido a que la temperatura del aire en la cámara (Tac) es mucho mayor que la temperatura ambiente (Tamb), Figura 3.

En **periodo cálido** (2.2C) se han comparado los sistemas con **pieza blanca** y se aprecia como en los tres prototipos las temperaturas alcanzadas en el muro interior superan los 30°C debido al calor acumulado en estos periodos con elevadas temperaturas nocturnas. Si comparamos los sistemas rehabilitados, se observa cómo las diferencias de temperatura en el muro interior son similares, aunque ligeramente inferiores en el sistema STE, Tabla 7.

Grupo	Prototipo	Sistema	DÍA						
			Radiación media (W/m²)	Tambiente media (°C)	TPieza media (°C)	TPieza máx. (°C)	Tcanal media (°C)	T muro media (°C)	Dif. muro Trehab-Tref (°C)
2.1T	REF	Baldosín	497	17.3	21.1	30.3	-	18.2	-
	A	PAs1n6A5			34.3	53.1	-	15.7	-2.6
	B	STEn6cc2A5			35.3	53.9	32.3	16.5	-1.7
2.2C	REF	Baldosín	424	27.4	34.0	42.4	-	35.8	-
	B	PAs1b6A5			26.9	34.5	-	35.3	-0.5
	A	STEb6cc2A5			27.2	35.3	26.8	34.8	-1.0

Tabla 7. Comparativa temperaturas promedio diurnas entre sistemas: STE y AP con pieza negra y blanca.

En los casos estudiados se ha observado que el sistema STE con pieza negra en clima templado y con pieza blanca en clima cálido tiene un mejor comportamiento térmico que un sistema aplacado PA.

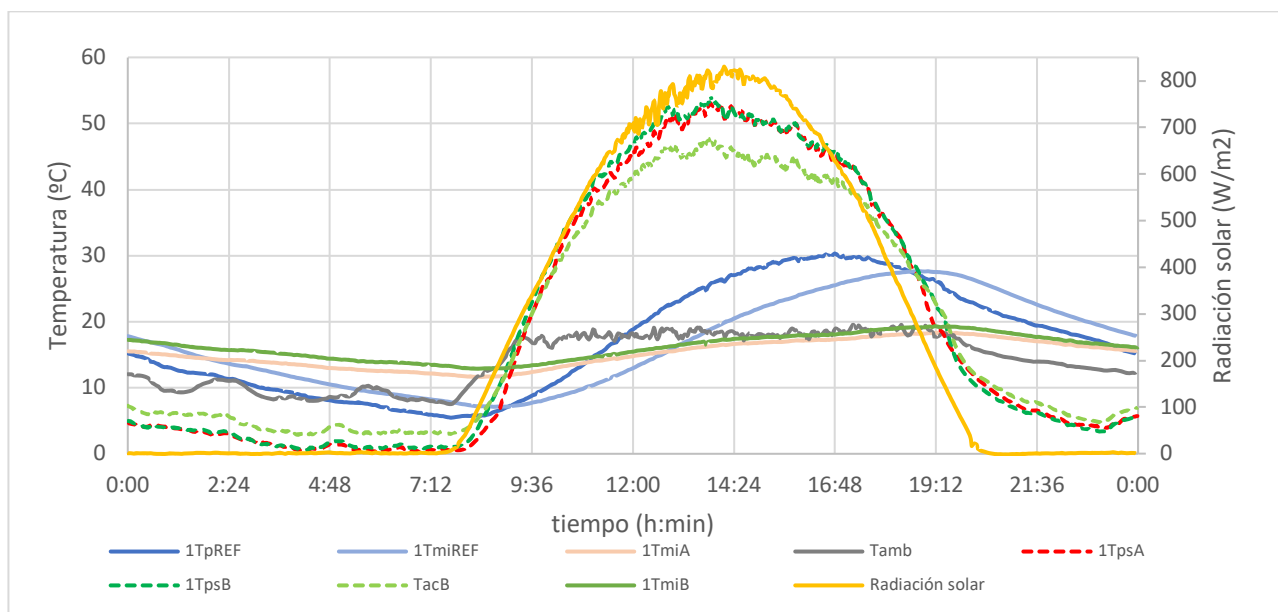


Figura 3. SISTEMA 2.1T: Prototipo REF / Prototipo A (PAs1n6A5) / Prototipo B (STEn6cc2A5)
04-04-202

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentan los resultados parciales obtenidos en el proyecto ROOFTILES II, centrado principalmente en la evaluación energética de soluciones constructivas cerámicas para la rehabilitación de cubiertas planas:

- Se han analizado las tipologías de cubiertas de los edificios existentes, así como los sistemas comerciales disponibles para la rehabilitación, **identificando las limitaciones** a considerar en la rehabilitación energética de cubiertas planas.
- Se han realizado simulaciones energéticas para evaluar el potencial de mejora de la rehabilitación energética, observando que es posible alcanzar reducciones de la **demanda energética global** de **hasta el 40%** rehabilitando la cubierta del edificio.
- Se han **diseñado y construido tres prototipos de validación** a modo de laboratorio energético, completamente sensorizados y climatizados, que permiten la evaluación de sistemas para cubiertas planas en las mismas condiciones ambientales. Para la adquisición y visualización de los datos, se ha implementado una **plataforma de monitorización** y control basada en servicios privados *cloud*.
- Se han **monitorizado a nivel experimental** diferentes sistemas cerámicos (cubierta invertida con pavimento aplacado y con suelo técnico elevado), modificando diferentes variables (color pieza, espesor de aislamiento, ventilación de la cámara, etc), así como sistemas cerámicos innovadores (piezas de reducido espesor con refuerzos, sistemas mixtos de aislamiento y mortero, piezas reversibles, etc.).
- Los resultados obtenidos durante la monitorización han permitido **evaluar la influencia** del efecto de: el aislamiento, el color de las piezas cerámicas y de la cámara del suelo técnico elevado sobre las ganancias térmicas a través de la cubierta. El estudio comparativo de los sistemas evaluados respecto al sistema sin rehabilitar ha permitido cuantificar las diferencias de temperatura que se alcanzan en cada caso. En **climas cálidos** la rehabilitación mediante sistemas de pavimento aplacado o suelo técnico elevado con aislamiento **permiten reducir las ganancias de calor**. Se ha observado como el color de la pieza influye notablemente en la temperatura alcanzada en las piezas superficiales de cubierta, siendo los colores claros los que alcanzan una menor temperatura. Dicho efecto se reduce a nivel de temperatura de muro interior debido a la atenuación de la transmisión que proporciona el aislante.
- En los casos estudiados se ha observado un **mejor comportamiento** cuando se rehabilita con un sistema de **Suelo Técnico Elevado** con pieza negra en clima templado y con pieza blanca en clima cálido. Para optimizar el comportamiento de estos sistemas en la rehabilitación de cubiertas, en el marco del proyecto se han propuesto dos **soluciones innovadoras**, una basada en el aprovechamiento del aire caliente que se genera en la cámara del suelo técnico elevado durante periodos fríos y la otra en el empleo de piezas reversibles con dos tonalidades de acabado.

7. AGRADECIMIENTOS

Este proyecto ha contado con el apoyo del Instituto Valenciano de Competitividad Empresarial (IVACE) a través de los Fondos Europeos de Desarrollo Regional (FEDER) y han participado las siguientes empresas: Becsa, Schlüter-Systems, Porcelanosa y Coloresmalt.