



Universidad de Valladolid.

FACULTAD DE CIENCIAS.



Trabajo Fin de Grado

Grado en FÍSICA.

Diseño, construcción y validación de un prototipo modificado de hot box de escala reducida para la evaluación de la conductividad térmica de diferentes materiales aislantes bajo condiciones controladas

Autor: Adrián Rojo de la Fuente

Tutor/es: Ismael Sánchez Calderón y Judith Martín de León

Año: 2024



Resumen:

Este trabajo se centra en el desarrollo y validación de una nueva e innovadora metodología para evaluar y caracterizar térmicamente diferentes materiales aislantes. Para ello, se ha diseñado un prototipo modificado a escala reducida de "hot box". Un hot box consiste en una cámara fría aislada térmicamente de una cámara caliente a través de un muro que actúa como muestra a caracterizar. El proceso de construcción se ha llevado a cabo y los resultados obtenidos han sido validados mediante comparación con un conductímetro de flujo de calor comercial.

En primer lugar, se ha fijado la metodología y calibrado el prototipo utilizando una muestra de poliestireno extruido (XPS) de 4 cm de espesor. Los ensayos involucran dos periodos estacionarios de diferente amplitud térmica y características, regiones donde se ha analizado la distribución de temperaturas y evaluado la conductividad térmica mediante medidas de temperatura y flujo de calor.

En segundo lugar, se ha analizado el comportamiento térmico de muestras de diferentes espesores (1, 2, y 8 cm). Los resultados para los especímenes de pequeñas dimensiones muestran precisiones con errores relativos inferiores al 4 % y 9 % en los intervalos térmicos respectivamente estudiados, mientras que las muestras de grandes dimensiones requieren un estudio particular debido a que los flujos de calor obtenidos son muy bajos.

En tercer lugar, se han ensayado y comparado diferentes aislantes térmicos comerciales como el poliuretano (PUR) y reciclado textil, para un espesor fijo de 4 cm. En este caso, los valores obtenidos para el PUR presentan errores relativos del 3 %, mientras que el error relativo para el reciclado textil alcanza cifras que rondan el 15 % debidas al pobre contacto entre la muestra y el sensor.

Finalmente, se han explorado nuevas posibles aplicaciones para la técnica donde se ha incluido un estudio gráfico orientado al análisis de propiedades dinámicas. Además, se proponen diversas rutas de mejora del prototipo y líneas de trabajo futuro.

Abstract:

This work aims on the development and validation of a new and innovative methodology to thermally evaluate and characterize different insulating materials and specimens. To achieve this, a modified small-scale prototype of “hot box” was designed. A hot box consists of a cold camera isolated from a hot camera through a wall that acts as the material under characterization. The construction process of this prototype was carried out and the results obtained were validated by comparison with a commercial heat flow meter.

First of all, a methodology has been established and the prototype has been calibrated using a 4 cm thick extruded polystyrene (XPS) board. The tests involve two stationary periods of different thermal amplitude and characteristics, regions where the temperature distribution has been analyzed. The thermal conductivity has been evaluated through measurements of temperature and heat flow.

Secondly, the thermal behavior of materials with different thicknesses (1, 2, and 8 cm) was analyzed. The results for small-sized specimens showed accuracies with relative errors below 4 % and 9 % in the respective thermal intervals studied. Meanwhile, larger samples require a specific study due to the low heat flow obtained.

In the third place, different commercial thermal insulators such as polyurethane (PUR) and recycled textiles have been tested and compared, for a fixed thickness of 4 cm. In this case, the values obtained for the PUR present relative errors around 3 %. However, the relative error for the recycled textile is high (15 %) due to the poor contact between the sample and the sensor.

Finally, new potential applications for the technique were explored, including a graphical study that aim to analyze dynamic properties. Additionally, various routes for improvement the device and future work lines are proposed.

Índice

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS:	1
1.1. Introducción:	1
1.2. Objetivos:	3
1.3. Marco de trabajo:.....	3
2. ESTADO DEL ARTE:	4
2.1. Conductividad térmica:	4
2.1.1 Parámetros relacionados con la conductividad térmica:.....	4
2.2. Aislantes térmicos:	5
2.2.1 Mecanismos de conducción térmica en materiales aislantes:.....	5
2.2.2 Aislantes térmicos en el sector construcción:.....	8
2.2.1 Técnicas de medida de la conductividad térmica:	10
2.3. Antecedentes de nuestro trabajo:	14
3. DESARROLLO EXPERIMENTAL:	18
3.1. Diseño, materiales, instrumentación y construcción:.....	18
3.1.2 Construcción:.....	20
3.2. Muestras a ensayo:	20
3.2.1 Configuración de las muestras, sensores y termopares:	21
3.2.2 Caracterización de muestras:.....	21
3.3. Medidas:.....	22
3.3.1 Ciclos e intervalos de medida elegidos:	22
3.3.2 Medidas de temperaturas y flujos:	22
3.3.2 Termografía infrarroja:.....	23
4. RESULTADOS:	24
4.1. Caracterización referencia de los materiales a estudio:	24
4.2. Metodología:.....	24
4.2.1 Análisis y tratamiento (XPS 4 cm):	25
4.3 Validación de la metodología:	29
4.3.1 Diferentes espesores de XPS:.....	29
4.3.2 Diferentes materiales:.....	33
4.4 Estudio gráfico orientado al ensayo de propiedades dinámicas:	36
5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO:	38
Bibliografía:	40

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS:

1.1. Introducción:

En las últimas décadas el consumo energético mundial se ha incrementado de forma exponencial [1]. Este rápido crecimiento está suscitando graves preocupaciones debidas a las dificultades de suministro, el agotamiento de los recursos energéticos y el fuerte impacto medioambiental (destrucción de la capa de ozono, calentamiento global, cambio climático, etc.). En particular, el consumo de energía en los edificios de uso tanto residencial como comercial ha llegado a superar a otros sectores importantes como la industria o el transporte [2]. Actualmente la demanda energética de los edificios representa cerca de un 40 % del consumo energético mundial y es responsable de aproximadamente el 37 % de las emisiones de gases de efecto invernadero [3]. Si no se toma ninguna acción se prevé que la demanda energética del sector aumente en un 50 % para 2050, debido al continuo crecimiento del número de hogares, residencias y áreas de servicio [4]. Por ello agencias como la Agencia Internacional de la Energía o las Naciones Unidas, han marcado diversas estrategias y oportunidades que permitan implementar políticas de eficiencia energética en el sector, con el objetivo de buscar soluciones inteligentes y materiales innovadores que permitan la construcción y renovación de edificios con mayor eficiencia energética, estrategia que supondría una reducción notable en el consumo y las emisiones de gases de efecto invernadero. Dentro de las estrategias marcadas, la mejora del rendimiento térmico de los edificios es un factor de suma importancia. Esto se debe a que gran parte de la energía consumida se invierte en climatizar estancias, pudiendo representar, dependiendo la eficiencia energética del edificio, desde un 18 % hasta un 73 % del gasto energético [5]. De esta forma, un buen aislamiento térmico es clave para evitar grandes pérdidas energéticas, y así reducir el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero.

Por ello, en los últimos años, se han creado diversas legislaciones que se encargan de regular los materiales aislantes utilizados en el sector construcción, con el fin de reducir el gasto energético en los edificios y así mitigar el cambio climático [6]. El parámetro fundamental que regula este tipo de normativas es la transmitancia térmica (*U-Value*). Esta magnitud relaciona el espesor de las paredes aislantes y materiales de construcción con su conductividad térmica (λ). La conductividad térmica tiene por unidades el $W/(m \cdot K)$, y se define como la capacidad que presenta un cuerpo para conducir energía en forma de calor. Como consecuencia, el *U-Value* es un parámetro que representa la capacidad para la transferencia del calor que tiene un determinado material de espesor dado cuando está situado en un gradiente térmico, y tiene por unidades el $W/(m^2 \cdot K)$. De esta forma, a menor *U-Value* mayor es la capacidad aislante del material, por ello es una magnitud normalmente empleada y requerida en la industria del aislamiento térmico. Los valores requeridos para la transmitancia térmica varían entre techos, paredes y suelos, típicamente entre los 0,2 - 0,4 $W/(m^2 \cdot K)$ [7,8]. Por otra parte, componentes como ventanas y puertas pueden contar con transmitancias térmicas superiores a la unidad. Los valores exigidos por la normativa también dependen del tipo de uso del edificio y la región climática donde se sitúa. Además, en climas fríos, el *U-Value* requerido suele ser menor que en las regiones climáticas más cálidas. Esto se debe a que en las regiones climáticas frías los gradientes térmicos suelen ser más acusados y mantener una temperatura interior adecuada puede suponer un gran gasto energético en calefacción, en consecuencia, emplear materiales con una alta capacidad de aislamiento térmico (bajos valores de *U-Value*) es una decisión apropiada para reducir las pérdidas en forma de calor y ahorrar energía.

Para reducir la transmitancia térmica y cumplir con las nuevas normativas existen dos posibles rutas. Por una parte, se puede aumentar el grosor de la capa de aislamiento mediante el uso de aislantes convencionales como el poliestireno expandido (EPS), el poliestireno extruido (XPS), las espumas de poliuretano rígido (PUR), las lanas minerales, las fibras textiles, o las perlitas

(Figura 1). Estos materiales se caracterizan generalmente por tener conductividades térmicas superiores a la del aire ($\lambda_{aire} \sim 26 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$ a 25°C y 1 atm). Esto implica la necesidad de producir grandes cantidades de material, y conlleva un importante impacto medioambiental y económico. Por otra parte, una ruta alternativa que presenta un enfoque más prometedor es el uso de materiales con menores conductividades. Estos materiales permitirían optimizar la anchura y transmitancia térmica de la capa aislante, no solo permitiendo ahorrar energía sino también aumentar la superficie útil de las estancias de viviendas y edificios. Por ello, hoy en día una de las líneas de investigación más importante en el sector del aislamiento térmico es la búsqueda de nuevos materiales aislantes, los llamados aislantes avanzados o superaislantes térmicos, como los aerogeles y los paneles de aislamiento de vacío (VIPs, por sus siglas en inglés) (Figura 1), que generalmente son materiales nanoestructurados y caracterizados por conductividades térmicas de entorno a los $10 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$.

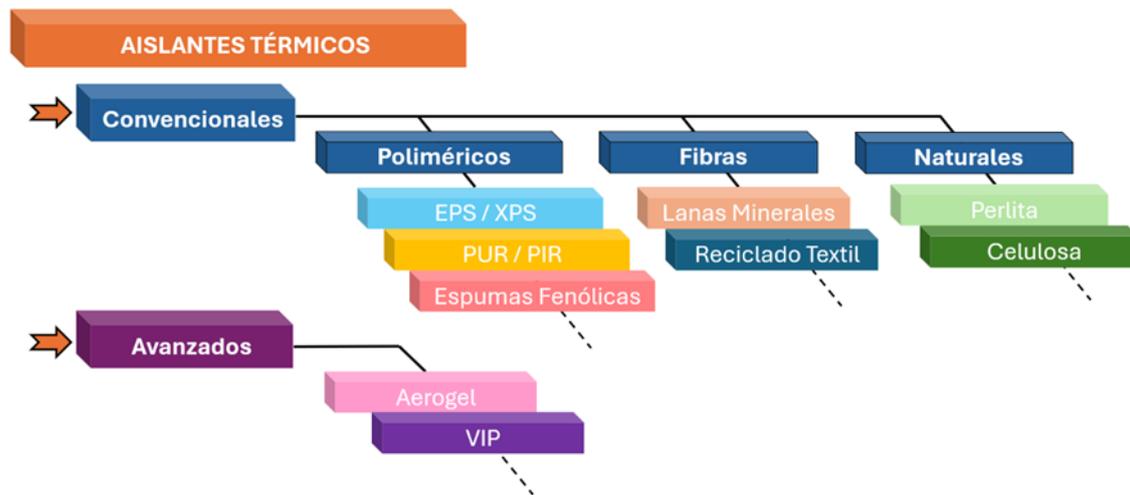


Figura 1. Clasificación de los diferentes aislantes térmicos.

Un requerimiento fundamental para comprobar si estos nuevos materiales son viables, es evaluar sus propiedades experimentalmente. A la hora de caracterizar las propiedades térmicas de estos materiales, existen diversas técnicas y estándares de medida. Cada método cuenta con sus ventajas e inconvenientes, ya sean los tiempos de medida, la precisión, el precio del equipo o el tamaño de muestras necesario para los ensayos [9]. En este trabajo se busca adaptar una de las técnicas ya existentes, el método “hot box”, a muestras de escala laboratorio, así como explorar nuevos potenciales para esta técnica. En la literatura podemos encontrar la definición de Hot Box (HB), cuyo diseño básico consiste en una cámara térmicamente aislada y dividida en dos compartimentos, por lo general, uno climatizado representando el exterior y otro calefactado representando el interior de lo que podría ser una vivienda o edificio. Entre ambas cámaras se localiza la muestra cuyas propiedades térmicas se quieren ensayar. Los hot box convencionales cuentan con algunas desventajas como largos tiempos de ensayo, elevado coste, o incapacidad de ensayar muestras de pequeñas dimensiones. En este apartado el presente proyecto adquiere su mayor significado, buscando desarrollar y validar un prototipo modificado de hot box de escala reducida y precio comedido, que permite ensayar muestras a escala laboratorio y con el que buscamos paliar algunas de las desventajas de la técnica.

1.2. Objetivos:

Hoy en día un buen aislamiento térmico es necesario para aumentar la eficiencia energética de los edificios, reducir el consumo energético y con ello las emisiones de gases de efecto invernadero. Por ello, a parte de la continua investigación relativa a mejorar los materiales aislantes térmicos existentes o desarrollar nuevos superaislantes térmicos, es muy importante disponer de metodologías y equipos que permitan caracterizar y evaluar las propiedades térmicas. De esta forma, el objetivo principal de este trabajo es el desarrollo y validación de un prototipo que permita determinar las características térmicas de diferentes materiales aislantes bajo condiciones controladas.

Para ello, se han marcado los siguientes objetivos secundarios:

- Diseño y desarrollo de un prototipo de Hot Box (*HB*) de pequeñas dimensiones.
- Caracterización de los materiales bajo estudio (poliestireno extruido (XPS), poliuretano rígido (PUR) y reciclado textil) en términos de densidad, estructura y conductividad térmica medida a través de un conductímetro de flujo de calor comercial (*HFM*).
- Desarrollo de una técnica y metodología de medida para una muestra de referencia de XPS de 4 cm de espesor.
- Validación experimental del equipo y metodología para diferentes espesores de XPS (1, 2 y 8 cm).
- Validación experimental del equipo y metodología para muestras de 4 cm de PUR y reciclado textil.
- Exploración de nuevas posibles aplicaciones para esta técnica, como la capacidad de ensayar muestras en condiciones dinámicas.
- Análisis de posibles mejoras para el equipo.

1.3. Marco de trabajo:

El prototipo ha sido desarrollado dentro del marco de trabajo de “CellMat Laboratory” (www.cellmat.es), perteneciente al Departamento de Física de la Materia Condensada, Cristalografía y Mineralogía de la Universidad de Valladolid (Facultad de Ciencias, Campus Miguel Delibes, Paseo Belén 7). El equipo se encuentra inmerso en diversas líneas de investigación en el campo de los materiales celulares, con el propósito común de desarrollar nuevos conocimientos y relaciones entre formulación, producción, estructura y propiedades, con miras a adaptarse a las demandas de las aplicaciones industriales contemporáneas que requieren materiales “a la carta”. Parte de su investigación se enfoca en el desarrollo de materiales celulares multifuncionales, en respuesta a la demanda de la sociedad e industria por materiales con propiedades avanzadas, abarcando sectores del mercado como: la automoción, el aeronáutico, las energías renovables, el embalaje, el sector construcción, etc. La estrategia de producción de estos materiales se basa en la utilización de formulaciones multifásicas mediante procesos de producción innovadores. Dentro de los diversos campos que abarca el equipo de CellMat, con sus materiales celulares, el aislamiento térmico representa una amplia línea de investigación, donde tanto la producción como la caracterización de estos materiales son factores de gran importancia. De esta forma, el desarrollo de metodologías alternativas de caracterización de propiedades térmicas es un enfoque interesante, por ello, el prototipo desarrollado en este trabajo puede aportar nuevas posibilidades al equipo de CellMat, ampliando “el catálogo” de técnicas a su alcance para el ensayo térmico de materiales aislantes celulares.

2. ESTADO DEL ARTE:

2.1. Conductividad térmica:

La conductividad térmica (λ) es una propiedad intensiva que mide la capacidad que tiene un cuerpo de transmitir energía en forma de calor cuando es sometido a un gradiente de temperatura y sus unidades son el $W/(m \cdot K)$. Su definición viene dada por la ley de Fourier para la conducción térmica (ecuación (2.1)). Esta ecuación sostiene que la densidad del flujo de calor (\vec{q}) de un material, es proporcional al gradiente negativo de temperaturas ($\vec{\nabla}T$), con constante de proporcionalidad λ . Por otra parte, la densidad de flujo térmico se define acorde a la ecuación (2.2), como la variación temporal del calor transferido ($\partial \vec{Q} / \partial t$, flujo de calor o flujo térmico), por unidad de área normal a la dirección que este atraviesa (A).

$$\vec{q} = -\lambda \vec{\nabla}T \quad (2.1)$$

$$\vec{q} = \frac{\partial \vec{Q}}{\partial t} \quad (2.2)$$

La densidad de flujo térmico es considerada una magnitud vectorial, con módulo, dirección y sentido, marcado por la segunda ley de la termodinámica (el calor siempre fluye en la dirección de las temperaturas más bajas). Por su parte, la conductividad suele ser considerada una magnitud escalar, Sin embargo, puede variar en posiciones o direcciones locales en el caso de materiales que presenten anisotropía.

2.1.1 Parámetros relacionados con la conductividad térmica:

La conductividad térmica es uno de los principales parámetros a la hora de caracterizar las propiedades térmicas de los materiales. En relación con esta magnitud, existen diferentes parámetros que se suelen utilizar dependiendo del cálculo a realizar:

a. Resistividad térmica:

La resistividad térmica (R_λ) es una magnitud intensiva relacionada con la capacidad que tiene un material para resistir al flujo de calor. Esta magnitud se define como el recíproco de la conductividad térmica (ecuación (2.3)) y sus unidades son $(m \cdot K)/W$.

$$R_\lambda = \frac{1}{\lambda} \quad (2.3)$$

Por tanto, materiales con bajas conductividades presentarán una alta resistividad térmica al flujo de calor. De esta forma materiales con elevados valores de R_λ cuentan con un gran potencial como aislantes térmicos.

b. Resistencia térmica por unidad de área:

La resistencia térmica por unidad de área ($R-Value$) es una propiedad extensiva que relaciona la resistividad al flujo de calor y el espesor de la muestra. Esta magnitud está vinculada con la resistividad y, por tanto, con la conductividad térmica. Sus unidades son $(m^2 \cdot K)/W$. Y puede obtenerse a partir de la ecuación (2.4), donde d denota la anchura de la muestra en la dirección paralela al flujo térmico.

$$R - Value = R_\lambda \cdot d = \frac{d}{\lambda} \quad (2.4)$$

c. Transmitancia térmica:

La transmitancia térmica (*U-Value*) se define como la cantidad de calor transferido a través de un material en función del gradiente de temperaturas y el espesor de la muestra (ecuación (2.5)). Esta magnitud es la inversa del *R-Value*, y sus unidades son, por tanto, $W/(m^2 \cdot K)$.

$$U - Value = \frac{1}{R - Value} = \frac{\lambda}{d} \quad (2.5)$$

Tanto el *R-Value* como el *U-Value* permiten comparar la capacidad de aislamiento térmica de los materiales para un espesor dado y por ello son propiedades empleadas con frecuencia en el sector construcción para optimizar la eficiencia energética de los edificios.

2.2. Aislantes térmicos:

Aquellos materiales que presentan conductividades térmicas menores que $100 \text{ mW}/(m \cdot K)$ reciben el nombre de aislantes térmicos [10]. La capacidad aislante de estos materiales esta intrínsecamente relacionada con las características estructurales que gobiernan los diferentes mecanismos de conducción térmica.

2.2.1 Mecanismos de conducción térmica en materiales aislantes:

Los materiales aislantes térmicos están constituidos por estructuras bifásicas (*Figura 2*), donde se alternan fase sólida y gaseosa. Esta estructura bifásica es la clave que permite a estos materiales alcanzar las bajas conductividades que presentan, dado que al reducir la fase sólida e introducir una fase gaseosa de mucha menor conductividad, la conductividad total disminuye drásticamente. Dependiendo de cómo se alternan estas fases, podemos encontrar diferentes tipos de estructuras bifásicas. Por un lado, encontramos estructuras continuas donde la fase sólida forma un continuo y la fase gaseosa se encuentra dispersa y atrapada en celdas (que pueden o no estar conectadas), un ejemplo de este tipo de estructuras podría ser la de un polímero celular (materiales celulares cuya fase sólida es de origen polimérico) como el poliestireno extruido (XPS) (*Figura 2.a*). Por otro lado, podemos encontrar estructuras discontinuas donde se rompe la continuidad de la fase sólida. Un ejemplo de ello serían estructuras como las lanas minerales o los reciclados textiles, donde las fibras se entrelazan unas con otras dejando espacios ocupados por la fase gaseosa (*Figura 2.b*). Finalmente, también existen otros tipos de estructura discontinua, formadas a partir partículas nanométricas en contacto, como podría ser la estructura de un aerogel (*Figura 2.c*). Para este tipo de casos donde no hay una clara definición de celda, se suele hablar de tamaño efectivo de celda o poro [11].

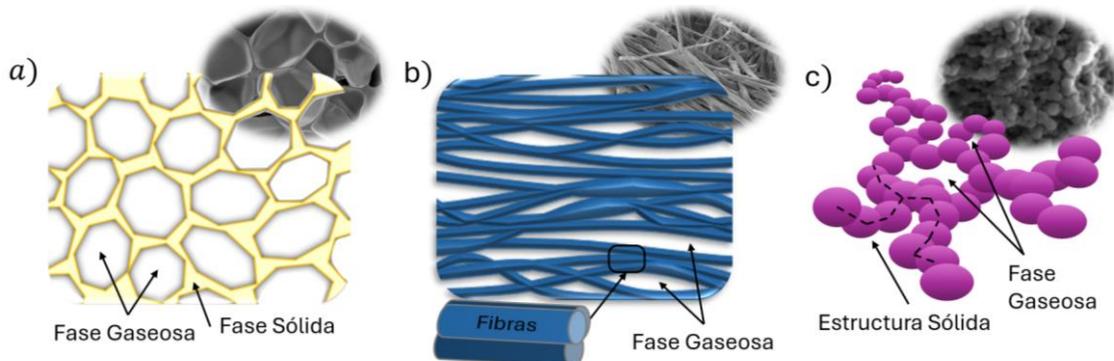


Figura 2. Diferentes estructuras bifásicas: a) Estructura continua celular. b) Estructura discontinua tipo fibras. c) Estructura discontinua tipo aerogel.

Al presentar estructuras bifásicas, la conductividad térmica de estos materiales puede describirse como la suma de los diferentes mecanismos, como recoge la ecuación (2.6). Donde λ_s y λ_g representan la conducción a través de la fase sólida y gaseosa respectivamente, λ_c es el término asociado a la convección dentro de los poros o entre fibras, y λ_r es el término de radiación. En particular, el término λ_c representa el intercambio de calor por el movimiento masivo de moléculas del gas producido por diferencias de densidad entre masas de aire a diferentes temperaturas, se ha demostrado experimentalmente que puede ser despreciado cuando el tamaño efectivo de las celdas o poros se encuentra por debajo de los 2 mm [12,13].

$$\lambda_t = \lambda_s + \lambda_g + \lambda_c + \lambda_r \quad (2.6)$$

La *Figura 3* muestra un ejemplo de los mencionados mecanismos de conducción para un polímero celular, donde se ha negado la contribución asociada a la convección dentro de celdas ya que el material cuenta con estructuras cuyo tamaño efectivo de celda se encuentra en el rango micrométrico.

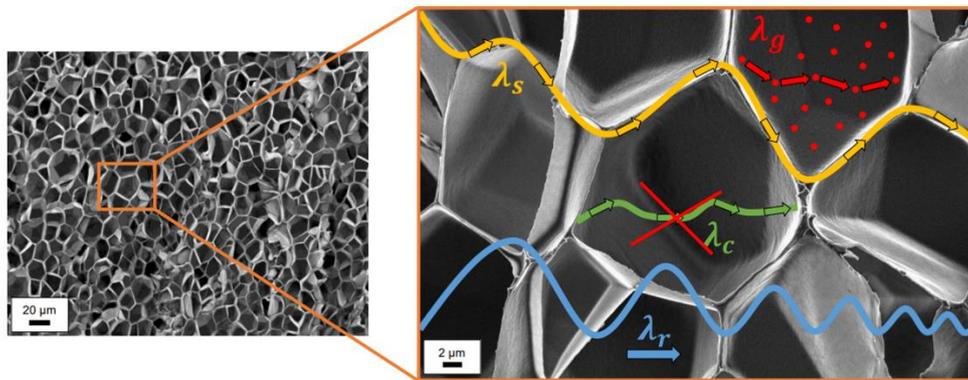


Figura 3. Ejemplo de los diferentes mecanismos de conducción para un polímero celular. [14]

a. Conducción a través de la fase sólida:

La conducción a través de la fase sólida (λ_s), da cuenta de la energía térmica que se transmite mediante las vibraciones moleculares a través de los diferentes tipos de estructura sólida del material. En particular, el tipo de estructura es crítico a la hora de tener en cuenta este mecanismo dado que, en las estructuras continuas, la conducción del calor a través de la fase sólida es mucho más fácil que en estructuras discontinuas donde los diferentes puntos de contacto actúan como resistencias térmicas adicionales [15]. El término λ_s , se puede modelar a partir de la siguiente expresión (ecuación (2.7)).

$$\lambda_s = \lambda'_s X_s g \quad (2.7)$$

Donde λ'_s es la conductividad del sólido, X_s es la fracción de fase sólida, y g es un factor de eficiencia estructural que da cuenta del tipo de estructura. Por ejemplo, para aerogeles g toma valores en torno a 0,05 [16], mientras que para polímeros celulares de muy baja densidad ($< 50 \text{ kg/m}^3$) este valor puede variar entre 1/3 - 2/3 dependiendo de si la fase sólida se concentra en las aristas o en las paredes celulares [17].

b. Conducción a través de la fase gaseosa:

La conducción del calor a través de la fase gaseosa λ_g , implica mecanismos de transmisión mediante los choques entre las moléculas que componen la fase gaseosa y se puede obtener a partir de la ecuación (2.8) para materiales con un tamaño de celda efectivo superior a la micra.

$$\lambda_g = \lambda'_g X_g = \lambda'_g (1 - X_s) \quad (2.8)$$

Donde λ'_g representa la conductividad del gas que conforma la fase gaseosa y X_g la fracción de fase gaseosa. En aislantes convencionales de muy baja densidad ($< 50 \text{ kg/m}^3$) esta contribución es significativa y puede suponer hasta un 70 % sobre la conductividad total [18].

Por otro lado, en materiales avanzados como los aerogeles o los VIPs se reduce esta alta contribución de la fase gaseosa tomando ventaja del denominado efecto Knudsen [18,19]. El efecto Knudsen consiste en que cuando los tamaños efectivos de celda son comparables o inferiores al recorrido libre medio de las moléculas en el gas (distancia media recorrida por una molécula antes de colisionar con otra adyacente) las moléculas de gas apenas colisionan entre sí, chocando con las paredes del sólido en su lugar, reduciéndose drásticamente transferencia de energía cinética y, por tanto, el calor transferido. El efecto Knudsen, depende del recorrido libre medio de las moléculas del gas l_g (que a su vez depende a su vez de la presión (p), temperatura (T), del número de Avogadro (N_A), la constante de los gases ideales (R) y del diámetro molecular (d_m) [20]), un factor β (parámetro adimensional que relaciona la transferencia de energía entre las moléculas de gas y la estructura sólida que varía entre 1,5 y 2 para argón y nitrógeno [21]), el tamaño de celda ϕ y la conductividad térmica del gas libre λ'_{g0} , como se muestra en la ecuación (2.9). En particular, para condiciones de presión y temperatura ambiente, el recorrido libre medio de las moléculas de aire (nitrógeno) es de aproximadamente 70 nm (Figura 4.a), en consecuencia, el efecto Knudsen tendrá lugar en materiales cuyas estructuras encierren aire con tamaños de poro efectivo menor que la micra (Figura 4.b), como pueden ser los aerogeles. Por otra parte, otra aproximación se basa en hacer vacío a materiales porosos como son los núcleos de los paneles de aislamiento de vacío (VIPs), de esta forma el recorrido libre medio de las moléculas del gas aumenta notablemente y la contribución de la fase gaseosa puede llegar a ser negada.

$$\lambda'_g = \frac{\lambda'_{g0}}{1 + \frac{2\beta l_g}{\phi}} = \frac{\lambda'_{g0}}{1 + \frac{2\beta}{\phi} \frac{RT}{\sqrt{2}\pi d_m^2 N_A p}} \quad (2.9)$$

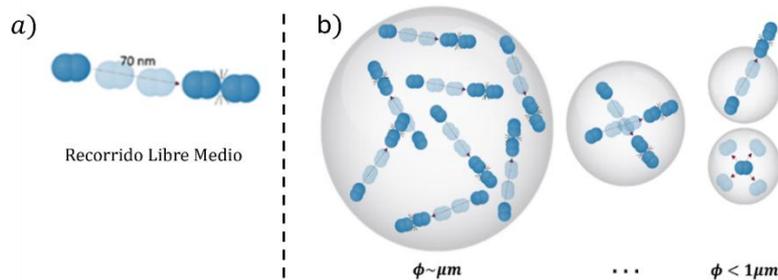


Figura 4. a) Esquema del recorrido libre medio moléculas de aire. b) Dinámica del gas encerrado para tamaños de celda efectivo desde el rango micro al nanométrico. Adaptada de [22].

c. Conductividad térmica asociada a la radiación:

Por el hecho de estar a cierta temperatura los materiales emiten, reflejan y absorben radiación. Si consideramos un cuerpo negro (hipotético modelo perfecto de cuerpo que absorbe toda la radiación que le llega y que reemite al mismo ritmo), a temperatura ambiente ($T \sim 300 \text{ K}$), el máximo de radiación emitida está centrado en torno a las diez micras (Figura 5). Este valor está situado en la región infrarroja del espectro electromagnético (rango atribuido a longitudes de onda entre 700 nm y 1 mm). Por ello, el término λ_r esta atribuido a la radiación térmica infrarroja. Para materiales aislantes bifásicos, esta contribución se debe principalmente a dos procesos: dispersión debida a la estructura del material y absorción de radiación por la fase sólida, siendo esta última la responsable de gran parte de la radiación absorbida [13,23]. Además, cabe destacar que la radiación infrarroja dispersada disminuirá cuando el tamaño de

las estructuras comienza a ser del orden de su longitud de onda. En consecuencia, a escalas nanométricas la contribución del término radiativo aumenta significativamente [24]. Esta contribución puede ser estimada a partir de la ecuación (2.10) [25]. Donde n representa el índice de refracción efectivo del material, σ es la constante de Stefan-Boltzmann, T es la temperatura de la muestra, y K_e el coeficiente de extinción del material.

$$\lambda_r = \frac{16 n^2 \sigma T^3}{3 K_e} \quad (2.10)$$

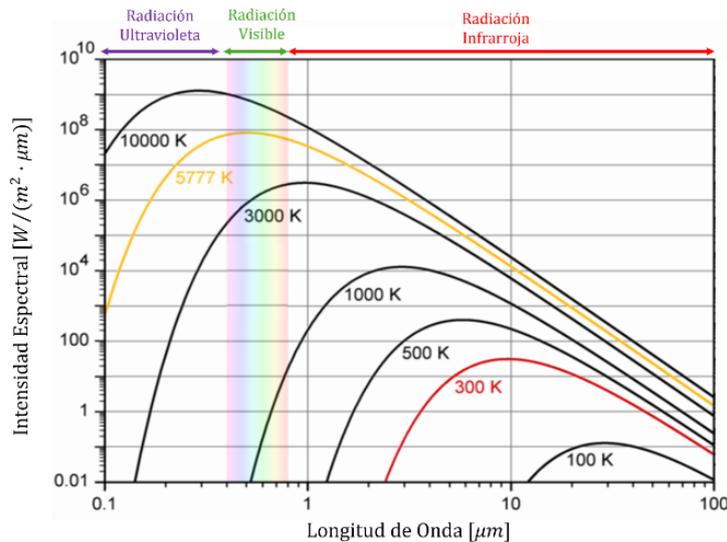


Figura 5. Espectro de radiación cuerpo negro.

2.2.2 Aislantes térmicos en el sector construcción:

Hoy en día, los materiales aislantes más utilizados en el sector construcción se caracterizan por conductividades térmicas en el rango de 4 a 60 $mW/(m \cdot K)$ [26,27] (Figura 6).



Figura 6. Rendimiento térmico de diferentes aislantes comerciales. Adaptada de [28].

Estos materiales cuentan con densidades relativamente bajas, que no superan los 250 kg/m^3 , para los más densos, tal como se muestra en la Figura 7.a. Algunos de estos son de origen natural

como la perlita expandida, que se deriva de una roca volcánica porosa y ligera debido a las burbujas de gas atrapadas en el magma al solidificar. Este material poroso presenta conductividades que rondan los $47 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$ con una densidad de aproximadamente $110 \text{ kg}/\text{m}^3$, y permite fabricar paneles ignífugos debido a su alta resistencia a la llama. Por otro lado, existen materiales aislantes formados por fibras como el reciclado textil o la lana mineral (ya sea de roca o vidrio), que presentan conductividades térmicas desde los 31 a los $42 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$ con un amplio rango de densidades ($15\text{-}200 \text{ kg}/\text{m}^3$). Siguiendo con la tendencia, hacia conductividades menores, encontramos a los polímeros celulares, como el poliestireno expandido (EPS), el poliestireno extruido (XPS), el poliuretano (PUR), el poliisocianurato (PIR) y las espumas fenólicas. Atendiendo a la conductividad térmica, el EPS y el XPS presentan valores en el rango de $31\text{-}38 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$, mientras que el PUR, el PIR y las espumas fenólicas se caracterizan por conductividades menores dado que durante su proceso de fabricación se busca que los gases provenientes de la reacción de espumado queden atrapados en el interior del material. Estos gases están caracterizados por conductividades menores a la del aire ($\lambda_{\text{aire}} \sim 26 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$ a 25°C y 1 atm) y tienden a escapar con el tiempo, degradando la conductividad térmica de estos materiales a lo largo de los años, por ello la conductividad de estos aislantes térmicos se encuentra en el rango de los 24 a los $35 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$. En general los polímeros celulares se caracterizan por tener bajas densidades que rondan los $25 \text{ kg}/\text{m}^3$, a excepción de las espumas fenólicas cuyos valores típicos son algo superiores y del orden de los $100 \text{ kg}/\text{m}^3$. Por último, tenemos a los aerogeles y paneles aislantes de vacío (VIPs), materiales que lideran el gráfico con las conductividades térmicas más bajas y por lo que suelen recibir el sobrenombre de superaislantes térmicos, con conductividades térmicas en torno a los $10 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$.

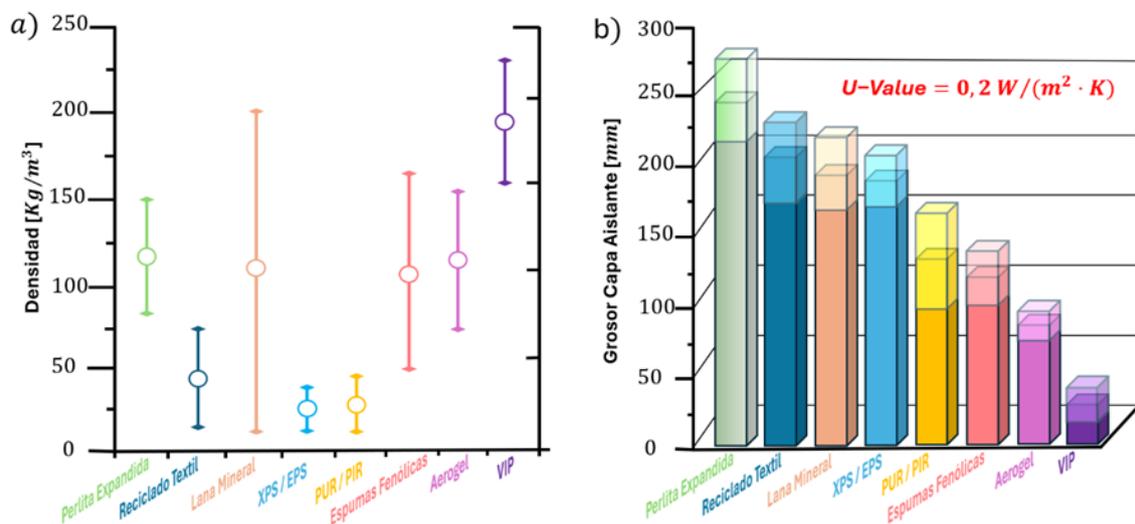


Figura 7. a) Rangos de densidades de los aislantes térmicos comerciales. b) Grosor de la capa de aislamiento necesaria de cada material para alcanzar una transmitancia térmica de $0,2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Adaptada de [28].

Finalmente, para dotar de aplicabilidad a los aislantes térmicos, es interesante comparar cual es el grosor necesario de cada material para alcanzar un determinado valor de transmitancia térmica ($U\text{-Value}$). De esta forma en la *Figura 7.b* se recogen los grosores necesarios de cada material para alcanzar una transmitancia térmica de $0,2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. En ella encontramos que, por ejemplo, materiales como el reciclado textil necesitan grosores que rondan los 200 mm para cumplir con el $U\text{-Value}$ establecido, mientras que aislantes térmicos

como el poliuretano son capaces de lograr dichos valores con aproximadamente la mitad de este grosor. Por otro lado, los superaislantes térmicos permiten obtener este valor de transmitancia térmica mediante espesores inferiores a los 50 mm, esto supone contar con paredes aislantes con grosores cerca de cinco veces inferiores a otras paredes en las que se empleen aislantes convencionales.

2.2.1 Técnicas de medida de la conductividad térmica:

Para poder caracterizar los diferentes aislantes térmicos y poder clasificarlos dependiendo de su conductividad, lo más importante es disponer y seguir metodologías adecuadas.

Dependiendo de cómo se resuelve la ecuación (2.1) se pueden encontrar diferentes técnicas de medida de la conductividad térmica. De esta forma podemos distinguir entre métodos de estado estacionario y métodos transitorios. Ambos tienen sus pros y contras, siendo útiles solo para ciertos tipos de materiales y sujetos a la temperatura de medición, propiedades térmicas, configuración específica de la muestra, etc. [29].

a. Métodos de estado estacionario:

Para los métodos de estado estacionario, se establecen unas condiciones de temperatura independientes del tiempo, de esta forma, las ecuaciones se simplifican notablemente, permitiéndonos integrar directamente la ecuación (2.1), como se muestra en (2.11).

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} \Rightarrow q \int_{T_1}^{T_2} dT = -\lambda \int_0^d dx \Rightarrow q(T_2 - T_1) = -\lambda d \quad (2.11)$$

$$\lambda = \frac{q \cdot d}{T_1 - T_2} = \frac{Q \cdot d}{A \cdot \Delta T}$$

El estado estacionario se alcanza cuando la diferencia de temperaturas entre los dos extremos de la muestra ($\Delta T = T_1 - T_2$) deja de ser función del tiempo y por tanto el flujo a través de nuestra muestra se mantiene constante, tal como se muestra en la *Figura 8*.

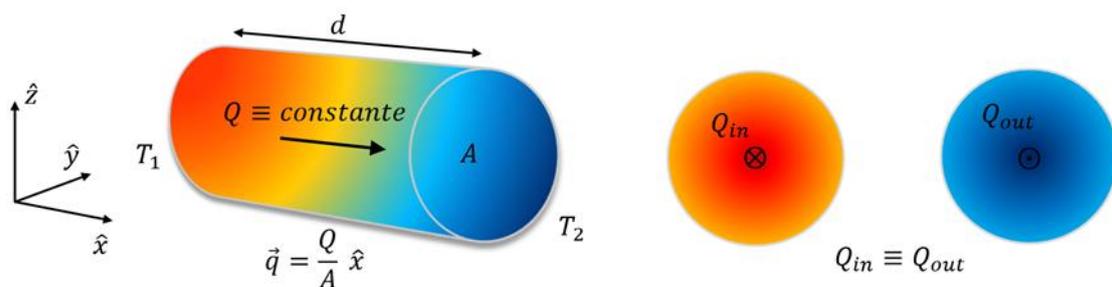


Figura 8. Estacionariedad de flujo térmico a través de una muestra de sección A y longitud o grosor d.

Dentro de las técnicas de medida estacionarias podemos encontrar los métodos de medida de conductividad por flujo de calor (*HFM*, siglas provenientes de su nombre en inglés *Heat Flow Meter*) y de medida de conductividad por plato caliente guardado (*GHP*, por su nombre en inglés *Guarded Hot Plate*) [30]. En la *Figura 9* se muestra un esquema de estos métodos.

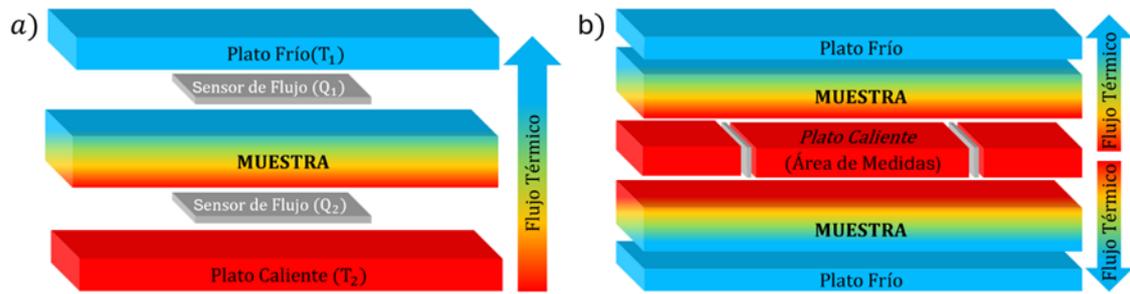


Figura 9. Métodos de medida estacionarios de la conductividad térmica: a) Conductivímetro de Flujo de Calor (HFM). b) Conductivímetro de Plato Caliente Guardado (GHP).

La técnica *HFM* se trata de un método relativo donde la conductividad térmica se determina a partir del flujo de calor obtenido a través de la caída de voltaje en un resistor, también llamado sensor o transductor de flujo, el cual debe ser calibrado previamente. Por otro lado, el *GHP* es considerado un método absoluto [31], donde la conductividad térmica se determina a partir de la potencia necesaria para mantener constante la temperatura del plato caliente. A la hora de determinar propiedades térmicas como la conductividad, cada técnica se apoya en diversos estándares internacionales que permiten obtener valores representativos y comparativos entre técnicas. Para equipos *HFM* se encuentran el ASTM C518 [32] y la ISO 8301 [33], mientras que el ASTM C177 [34] y la ISO 8302 [35] son estándares adaptados para *GHP*.

Los métodos de estado estacionario son los más adecuados y precisos a la hora de evaluar propiedades térmicas como la conductividad térmica para materiales aislantes. Las principales desventajas de este tipo de métodos son los largos tiempos de espera entre medidas y el tamaño de muestras necesario para ensayar (dimensiones mayores que $100 \times 100 \text{ mm}^2$) ya que estos equipos están diseñados de acuerdo con las normas previamente citadas. Dado que a escala de laboratorio es complicado fabricar, y por tanto medir y caracterizar, nuevos materiales aislantes avanzados de grandes dimensiones, varios autores han propuesto diferentes métodos para ensayar, mediante técnicas de estado estacionario, muestras de pequeñas dimensiones [36–38], solventando así parte de las desventajas de la técnica. Por ejemplo, Jannot et al. [36,37] desarrollan y mejoran la técnica del *GHP* para medir muestras en rangos muy próximos al centímetro. Por otra parte, Sánchez-Calderón et al. [38] se apoya en el uso de sensores externos de flujo de calor y temperatura montados en equipos *HFM* convencionales, permitiendo el ensayo preciso de muestras con superficies de $5 \times 5 \text{ cm}^2$.

b. Métodos transitorios:

En los métodos transitorios, la distribución de temperatura varía con el tiempo. En este caso la resolución de la ecuación (2.1) se complica debido a la introducción de la dependencia temporal en la ecuación del flujo térmico. Dos técnicas ampliamente utilizadas son el método de fuente plana transitoria (*TPS*, siglas provenientes de su nombre en inglés *Transient Plane Source*) y el flash láser (*LFA*, por su nombre en inglés *Laser Flash*). Dentro del método *TPS* existen diferentes variantes como el disco caliente (*Hot Disk*) técnica representada esquemáticamente en la *Figura 10* junto con el método *LFA*.

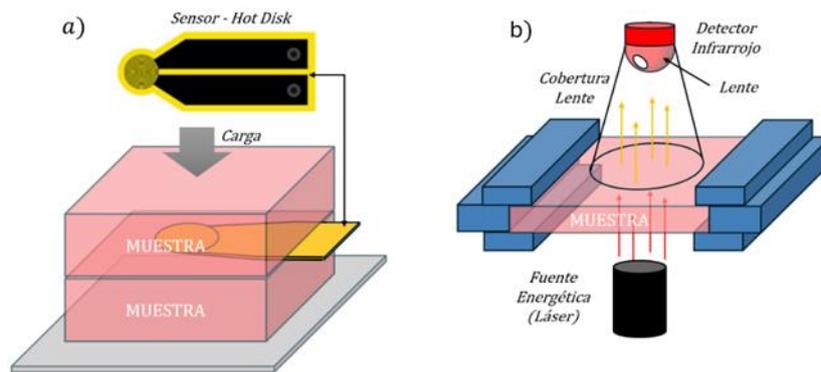


Figura 10. Métodos de medida transitorios de la conductividad térmica: a) Hot Disk (TPS). b) Laser Flash (LFA). Adaptada de [39].

En el Hot Disk, se emplea un sensor, que hace las veces de fuente y detector, que queda aislado entre dos caras de la muestra, sometido a una carga o presión para maximizar el contacto con la muestra. Durante el experimento se suministra una pequeña corriente constante al disco, que comienza a aumentar su temperatura dependiendo en gran medida de las dos muestras entre las que este queda aislado (Figura 10.a), permitiendo estimar sus propiedades térmicas. Por otro lado, en el Laser Flash se utiliza una fuente de luz para calentar el lado inferior de la muestra, mientras un detector infrarrojo se encarga de medir la dependencia temporal de la temperatura en el lado opuesto (Figura 10.b). Al igual que los métodos de estado estacionario, los métodos transitorios siguen ciertos estándares de medida, por ejemplo, la ISO 22007-2 [40] es un estándar para equipos TPS, mientras que en el método LFA se sigue la ISO 22007-2 [41].

Los métodos transitorios tienen como ventajas, en contraposición con los métodos de estado estacionarios, los cortos tiempos de espera y la capacidad de ensayar muestras de pequeñas dimensiones. Sin embargo, la precisión de estos métodos es cuestionable. En particular, han demostrado no ser adecuados para la caracterización de materiales aislantes, encontrándose desviaciones superiores al 15 % respecto de los valores obtenidos mediante técnicas estacionarias [42].

c. Otros métodos:

– Termografía infrarroja (IRT):

La termografía infrarroja (IRT) es un método ampliamente extendido en el sector construcción, esta técnica se basa en el principio físico por el cual todo cuerpo por encima de $0\text{ }^{\circ}\text{K}$ emite radiación térmica, que depende de su temperatura y emisividad (parámetro que relaciona la energía emitida por la superficie del objeto y la que emitiría un cuerpo negro de las mismas características). De esta forma, las cámaras infrarrojas capturan la radiación infrarroja emitida por la superficie de los objetos y crean una imagen de distribución superficial de temperaturas. La técnica IRT puede ser abordada desde un marco cualitativo o cuantitativo. La termografía cuantitativa permite estimar propiedades como la transmitancia térmica (*U-Value*) de elementos y materiales de construcción. Por ejemplo, algunos autores han optado por el desarrollo de metodologías alternativas que permiten medidas “In-Situ” [43,44]. Por otro lado, la termografía cualitativa suele ser empleada con fines complementarios a otras técnicas, permitiendo un estudio visual y relativamente preciso de la distribución superficial de temperaturas sobre la muestra, con tiempos de medidas cortos en contraposición con otros métodos. Por ello, el método IRT resulta realmente útil a la hora de evaluar pérdidas térmicas en la fachada de edificios o componentes de construcción, permitiendo identificar y estudiar fenómenos como la dinámica de flujos de aire filtrado a través de bordes y juntas de la envolvente térmica (Figura 11) [45]. Debido a las múltiples aplicaciones de la técnica, se han

establecido numerosos estándares de medida. En concreto, para la aplicación de la termografía como técnica de caracterización térmica de propiedades (*IRT* cuantitativa) encontramos el estándar ISO/FDIS 9869-2 [46], norma actualmente en desarrollo para determinar la transmitancia térmica de componentes de construcción mediante medidas directas (In-Situ). Por otro lado, a la hora de detectar irregularidades en la envolvente de los edificios, terminología de caracterización no destructiva y principios generales de la técnica, encontramos estándares como: , el ASTM E1316-17a [47], la ISO 6781-1:2023 [48], y la ISO 10880:2017 [49].

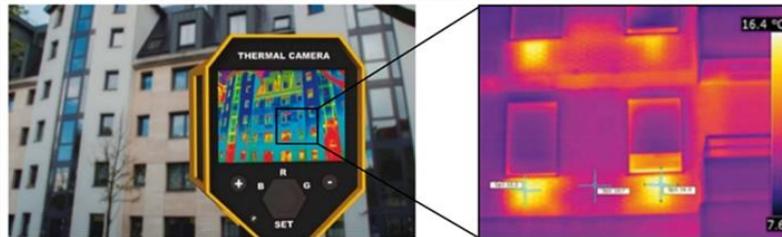


Figura 11. Fachada de un edificio evaluada mediante termografía infrarroja. Adaptada de [45].

Al igual que el resto de técnicas, el método *IRT* presenta ciertas desventajas: como el elevado precio del equipamiento (aunque normalmente inferior al necesario en otras técnicas anteriormente mencionadas) y la posible influencia del entorno en las medidas en exteriores (clima, contaminación, humo, o rangos de temperatura muy cercanos al de medida del equipamiento) complica la lectura y la interpretación de los datos por parte del equipo.

En este trabajo hemos empleado la termografía infrarroja con fines complementarios y de forma cualitativa, permitiéndonos un estudio básico del aislamiento y pérdidas energéticas de nuestro sistema.

– **Método de Hot Box (*HB*):**

El método de Hot Box (*HB*) es una técnica de medida estacionaria en la que se mide el flujo térmico a través de componentes de construcción sometidos a una diferencia de temperatura. Existen dos tipos de hot box: el *CHB* (Calibrated Hot Box), y *GHB* (Guarded Hot Box). El esquema correspondiente a estos métodos se recoge en la *Figura 12*. Ambos métodos son aptos para muestras horizontales o verticales, ya sean paredes, techos, suelos, etc. Sus grandes dimensiones suelen ser suficientes para estudiar componentes a escala completa. Los estándares en los que se basa esta técnica a la hora de la determinación de propiedades térmicas son el ASTM C1363-11 [50] y la ISO 8990 [51].

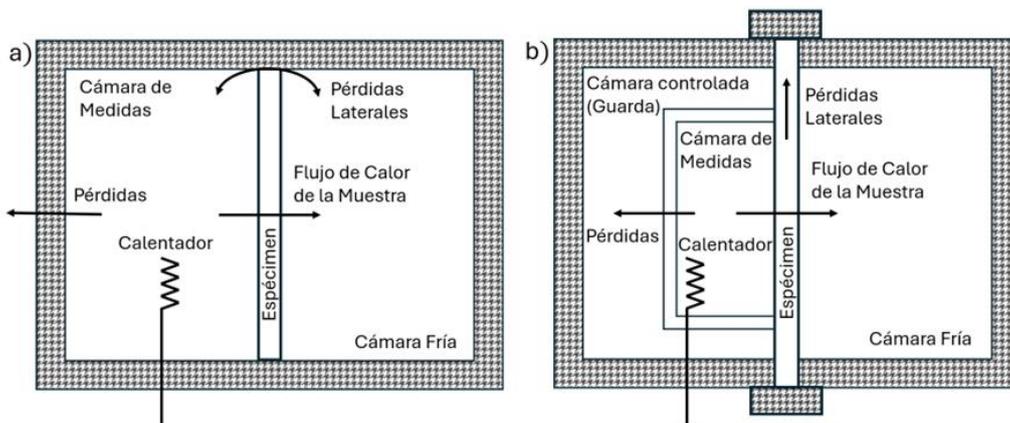


Figura 12. Tipos de Hot Box: a) *CHB* (Calibrated Hot Box). b) *GHB* (Guarded Hot Box). Adaptada de [50].

La principal diferencia entre el *CHB* y el *GHB* es la forma en la que la cámara de medidas o cámara caliente es rodeada, como se puede observar en la *Figura 12*. Para el *CHB* la cámara de medidas se encuentra directamente rodeada por las paredes laterales y necesita un ambiente externo controlado. Por otro lado, el *GHB* emplea una cámara de temperaturas que actúa como guarda de la cámara caliente, ambas se mantienen a temperaturas lo más próximas posibles, minimizándose de esta forma las pérdidas en forma de calor y permitiendo calibrar el aparato con mayor facilidad. En ambos métodos, el flujo térmico puede ser determinado mediante dos formas diferentes: la primera de ellas, y más habitual dentro de las técnicas *HB*, consiste en emplear la energía total suministrada a la cámara de medidas (corregida a partir de las ganancias o pérdidas que puedan existir en el sistema), mientras que la segunda forma implica el empleo de sensores de flujo de calor (que deben ser calibrados previamente). A pesar de ser una técnica de medida estacionaria, el hot box puede ser adaptado para medir en condiciones dinámicas, esto implica que las condiciones de temperatura dentro de una de las cámaras, generalmente la cámara fría o cámara climática, varíen de forma periódica o evolucionen temporalmente. En este apartado, Brown y Stephenson fueron unos de los primeros en presentar [52] y desarrollar [53] una de las primeras metodologías de medida para este tipo de condiciones.

Este tipo de métodos cuenta con una muy buena precisión y capacidad para ensayar diferentes materiales. Además, permiten ensayar muestras bajo condiciones climatológicas controladas sin necesidad de retirar la muestra, y sus amplias dimensiones hacen posible estudiar fenómenos a escala completa. Sin embargo, este tipo de equipos son caros, requieren tiempos de medida muy largos, una calibración periódica y muestras de tamaños industriales, lo que hace que no sea una técnica que se pueda emplear fácilmente a escala laboratorio.

Es por ello que en el presente trabajo se busca adaptar esta metodología a nuestros objetivos y necesidades, buscando un equilibrio entre precisión, coste, versatilidad, tamaños y tiempos de ensayo, tratando de paliar algunas de las desventajas de la técnica.

2.3. Antecedentes de nuestro trabajo:

En la literatura podemos encontrar diferentes prototipos de características y diseños semejantes a la técnica de *HB*, algunos de estos dispositivos están constituidos únicamente por una cámara, donde se efectúan las medidas, aislada del ambiente exterior mediante el aislamiento térmico a evaluar. De esta forma, las condiciones climáticas externas son monitoreadas, constituyendo las denominadas casas pasivas [54–56], prototipos que operan, por tanto, en condiciones dinámicas y generalmente validados o comparados a partir de simulaciones transitorias generadas por ordenador. Dentro de este tipo, encontramos trabajos como el de Ahmad et al. [54], donde se evalúan algunos aislantes innovadores como los VIPs y materiales de cambio de fase (materiales que emplean parte de la energía térmica recibida para cambiar de fase) mediante varios prototipos. Cada prototipo consta de cinco caras aisladas mediante el material o materiales a evaluar, mientras que la superficie restante es una cara cristalina que permite el paso de la luz solar (*Figura 13.a*). Por otra parte, otros trabajos muestran prototipos cuyos diseños buscan aprovechar las condiciones climáticas de la región para mantener una temperatura adecuada en el interior [55,56]. Por ejemplo, el prototipo de Boulebbina et al. [55] emplea un muro “Trombe” que permite aprovechar la radiación solar para calentar estancias en invierno mediante convección (*Figura 13.b*). Mientras que el prototipo de Tribuiani et al. [56] está construido a base de concreto de baja densidad con agregados ligeros y con 70 cm de grosor, donde una de sus caras ha sido cubierta externamente por aislamientos de yeso a base de corcho y XPS de 4 y 8 cm respectivamente, cada uno de los cuales cubre la mitad de esta cara (*Figura 13.c*) con el objetivo de evaluar que configuración permite obtener una menor temperatura superficial.

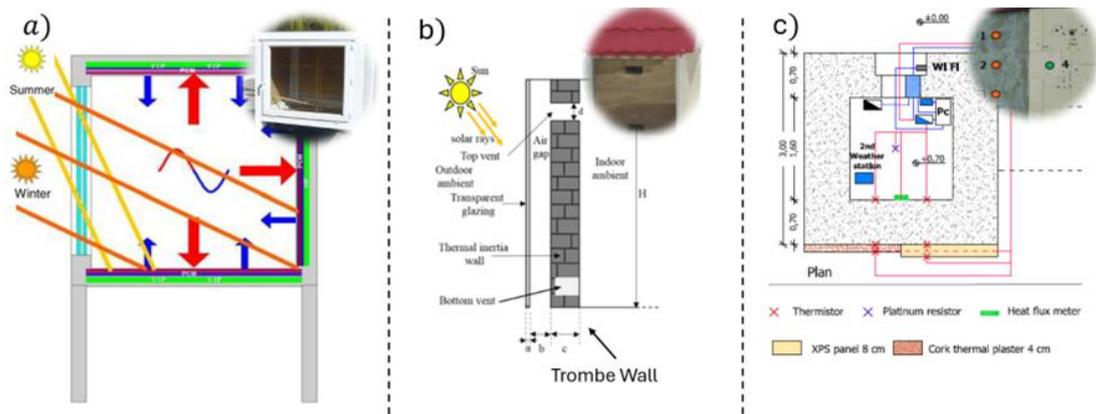


Figura 13. Casas pasivas: a) Prototipo de Ahmad et al. [54]. b) Prototipo de Boulebbina et al. [55]. c) Prototipo de Tribuiani et al. [56].

Por otra parte, encontramos prototipos de casas pasivas que, a diferencia de los anteriores, operan bajo condiciones controladas, más similares a la técnica de hot box propiamente dicha. En primer lugar, podemos encontrar equipos de “lamp box” prototipo desarrollado por Habib et al. [57] y posteriormente modificado en los trabajos de Ha et al. [58,59]. En este prototipo la fuente principal de calor son lámparas alógenas y su diseño se recoge en la Figura 14. El equipo consta de una estructura externa hecha de madera cuyas caras interiores se encuentran recubiertas por una película reflectante cuyo objetivo es homogeneizar el flujo de calor saliente por su cara abierta, donde se coloca la muestra a ensayo encargada de aislar la cámara caliente (lamp box) de la cámara climática cuyas condiciones son controladas, permitiendo además simular condiciones naturales. El equipamiento de medida en la cara interna consiste en un plato de aluminio en el que se encuentran localizados tanto los sensores de flujo como los termopares encargados de registrar los valores de flujo térmico y temperatura de la muestra. Los resultados de este trabajo muestran como el prototipo es capaz de obtener valores con un error inferior al 10% en ciclos de medidas relativamente cortos (6 horas).

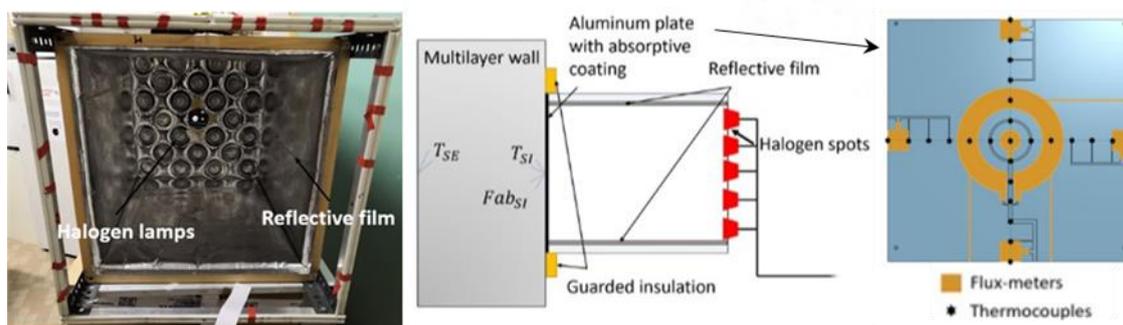


Figura 14. Prototipo de “Lamp box” e instrumentos de medida del trabajo de Ha et al. [59]

Recientemente diversos autores han optado por un enfoque diferente [60–65], compartiendo importantes similitudes con nuestra línea de trabajo, inspirándose directamente en la técnica de hot box para desarrollar prototipos modificados orientados al ensayo de especímenes y componentes aislantes térmicos. Por un lado, se opta por utilizar metodologías adaptadas que involucran además ensayos dinámicos de propiedades [60,61,63]. Por ejemplo, en el trabajo de O’Gradi et al. [60], se realiza un estudio mediante termografía infrarroja cuantitativa en el que se evalúa el comportamiento de envolventes térmicas en diferentes condiciones dinámicas donde se varía la velocidad del viento mediante una serie de ventiladores instalados en la cámara climática (Figura 15.a). Por otro lado en el trabajo de Shen et al. [63] se emplea la técnica de hot box para estudiar tanto propiedades térmicas estacionarias como dinámicas. Los autores

proponen un método innovador para evaluar propiedades térmicas dinámicas de componentes de construcción, empleando un prototipo a pequeña escala de hot box (Figura 15.b) y especímenes de escala reducida. Los resultados experimentales de los experimentos dinámicos son comparados con valores calculados mediante simulaciones en diferencias finitas. De esta forma, tres modelos a escala del hot box (escala 1, 1/2 y 1/3) son comparados y correlacionados entre sí. Los resultados y conclusiones de este trabajo refuerzan la hipótesis de equivalencia y practicidad de trabajar con modelos a escala reducida. Siendo necesario tener en cuenta factores como las dimensiones (anchura muestra) o el tiempo (ciclos más cortos, etc.) a la hora de evaluar propiedades dinámicas.

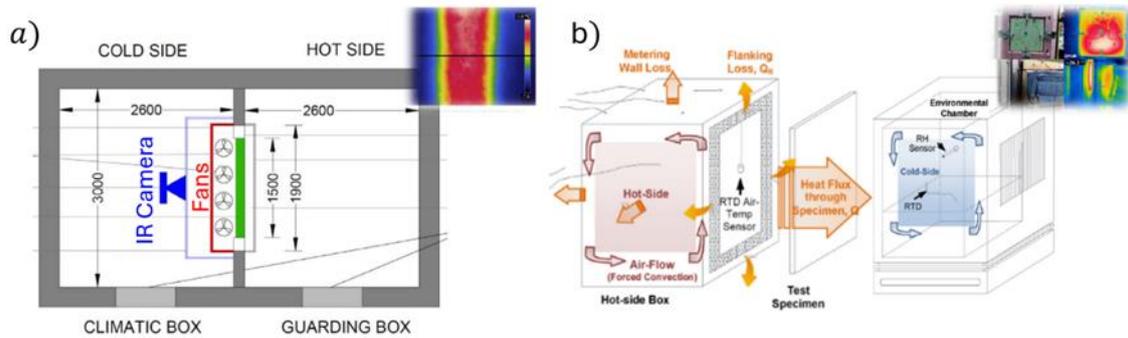


Figura 15. Diseños de HB: a) Prototipo de O'Gradi et al. [60]. b) Prototipo de Shen et al. [63].

Por otra parte, diversos autores mantienen el carácter estacionario de la técnica [62,64,65]. Por ejemplo, Lakatos et al. [62] aplican el método *HB* para estudiar dos configuraciones diferentes donde se emplean paneles aislantes de vacío, obteniendo valores cercanos a los que caracterizan a estos superaislantes térmicos, demostrando la efectividad de la técnica a la hora de ensayar materiales con elevado rendimiento térmico. Finalmente en los recientes trabajos de Alhawari et al. [64] y Alqahtani et al. [65] se presentan prototipos a pequeña escala de *CHB*, siguiendo la tendencia marcada por desarrollar prototipos adaptados de pequeñas dimensiones. El primero de ellos, cuenta con un volumen efectivo de 1 m^3 por cámara y ha sido construido a base de VIPs (25 mm de grosor) aislados entre cuatro capas de XPS (25 mm cada una), formando una especie de sándwich de paredes con un excelente rendimiento térmico y que permite al equipo alcanzar regímenes estacionarios con fluctuaciones máximas de 0,05 °C, obteniendo una notable precisión a la hora de medir conductividades térmicas (desviaciones inferiores al 3 %), donde el flujo térmico es calculado a partir de la potencia suministrada a la cámara de medidas. Sin embargo, alcanzar el estado estacionario en este equipo implica ensayos con duraciones superiores a las 48 horas y muestras con superficies de 1 m^2 . Por último, en el trabajo de Alqahtani et al. [65] el objetivo es desarrollar, producir y calibrar un hot box a escala reducida y precio razonable que permita ensayar aislantes de construcción, dando cuenta de su rendimiento térmico. Los materiales ensayados son paneles hechos en el laboratorio mediante técnicas de impresión 3D. El prototipo está construido a partir de paredes de EPS (10 cm de grosor) contando con un espacio de trabajo de $60 \times 100 \text{ cm}^2$, diseño recogido en la Figura 16. El equipamiento de medida consta de termopares, sensores de flujo de calor y sensores de temperatura de resistencia que se distribuyen simétricamente sobre la superficie caliente de la muestra, de esta forma, la transmitancia térmica es calculada a partir de medidas directas de temperaturas y flujos térmicos (registradas cada minuto). En cuanto a la duración de los ensayos, el equipo es capaz de alcanzar el estado estacionario en 3 horas y los autores emplean ciclos de 72 horas por material. El hot box fue calibrado a partir de una pared de EPS de conductividad conocida (10 cm de espesor) y validado empleando materiales estándar, obteniendo desviaciones máximas del 6 % comparado con los valores de la literatura. Este trabajo muestra

como los modelo a pequeña escala de hot box ofrecen ciertas ventajas respecto de los hot box convencionales a escala completa, como menor tiempo de ensayo, coste inferior y precisión aceptable, mostrándolo como una alternativa para evaluar propiedades térmicas de materiales aislantes.

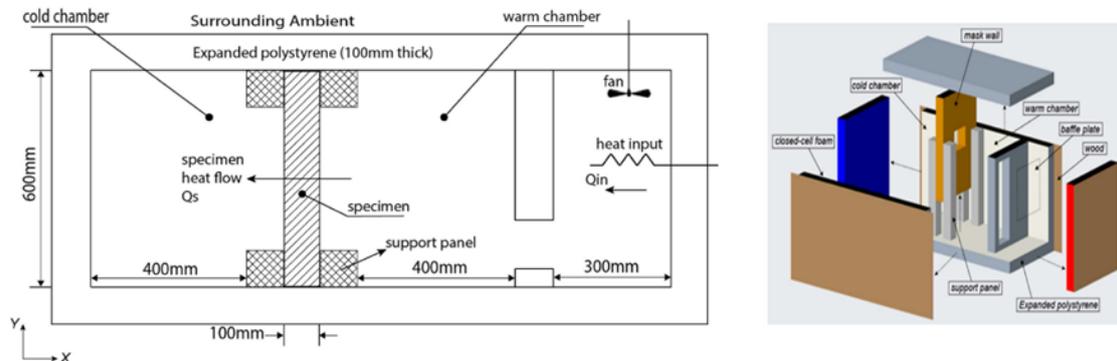


Figura 16. Esquema construcción y montaje realizado en el trabajo de Alqahtani et al. [65]

En particular, el presente trabajo gira en torno al diseño, construcción, desarrollo y validación de un prototipo a escala reducida de hot box que permita el ensayo de diferentes materiales aislantes con el fin de evaluar sus propiedades y rendimiento térmico en condiciones controladas, optimizando costes, tamaños, tiempos y errores, estableciendo así una nueva e innovadora metodología de trabajo. Todo ello motivado por la actual necesidad de contar con herramientas asequibles que puedan ser utilizadas para evaluar el rendimiento térmico de un material, dado el elevado coste de los equipos hot box comerciales y de las pruebas realizadas por laboratorios certificados, cuyos precios oscilan entre 6000 y 20000 dólares por muestra. [65]. Donde, de acuerdo con la literatura, los prototipos de hot box a escala reducida representan una manera eficaz de reducir costes y tiempos, manteniendo una precisión razonable.

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL:

3.1. Diseño, materiales, instrumentación y construcción:

El prototipo de hot box cuenta con unas dimensiones externas de $100 \times 200 \times 80 \text{ cm}^3$, y consta de dos cámaras que se mantienen a diferentes temperaturas, una caliente y otra fría, aisladas mediante una pared móvil intercambiable con capacidad de adaptar muestras de distintos tamaños y espesores, actuando como “máscara” de estas, y permitiendo así disponer de gran versatilidad a la hora de ensayar materiales. En la *Figura 17* se presenta el concepto principal de diseño del prototipo.

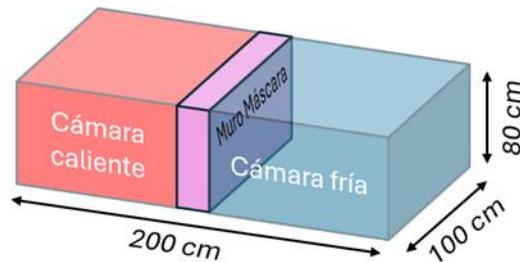


Figura 17. Concepto principal de diseño y dimensiones externas del prototipo de hot box.

3.1.1 Diseño, materiales e instrumentación:

Los materiales, equipo de adquisición de datos y sensores de medida empleados en la construcción del prototipo se presentan en la *Figura 18*.



Figura 18. Sensores, equipo de adquisición de datos y materiales de construcción: 1. Termopares tipo T ($\times 8$ uds). 2. PicoLog ($\times 1$ ud). 3. Sensores de flujo gSKIN®-XM ($\times 2$ uds). 4. Dataloggers gSKIN® ($\times 2$ uds). 5. XPS (16 m^2). 6. Cola contacto para PS ($\times 1$ ud). 7. Aislamiento reflectante (6 m^2). 8. Cinta doble cara para aislantes ($\times 1$ ud). 9. Planchas de madera de pino (5 m^2). 10. Cinta de aluminio ($\times 1$ ud). 11. Regletas ($\times 2$ uds). 12. Palé de madera ($\times 1$ ud). 13. Ruedas ($\times 12$ uds). 14. Tornillería, varillas, etc.

El montaje cuenta con un total de 8 termopares tipo T (aleación cobre-constantán, sensores operativos en rangos de temperatura de -75 a $250 \text{ }^\circ\text{C}$) conectados a un registrador de datos modelo USB TC-08 (Pico Technology) para la medida de temperaturas. Para la medida de flujos de calor se cuenta con dos sensores gSKIN®-XM (greenTEG AG) junto con dos registradores de datos gSKIN® DLOG-4219 (greenTEG AG). Esta combinación de sensor de flujo más registrador de datos permite medir en rangos de $\pm 550 \text{ W/m}^2$ con una resolución de

0,41 W/m^2 . Las dimensiones del sensor son $4,4 \times 4,4 \text{ mm}^2$ con un grosor de 0,5 mm. El sensor está calibrado en el rango de -30 a $70 \text{ }^\circ\text{C}$ con un método orientado al estándar ISO 8301 [33]. El error relativo en la medida es del 3 %.

El resto de materiales son elementos de bricolaje, aislamiento y construcción estándar, las dimensiones de las planchas de madera elegidas son de $200 \times 50 \text{ cm}^2$ con una anchura de 1,8 cm, por otro lado, las dimensiones de los paneles de XPS son $125 \times 60 \times 8 \text{ cm}^3$. El dispositivo ha sido construido a partir de los paneles aislantes de poliestireno extruido (XPS) de 8 cm de espesor y recubierto exteriormente por las planchas de madera e internamente por una cubierta aislante reflectante que ayuda a minimizar pérdidas en forma de radiación térmica. El equipo está montado sobre una plataforma móvil que permite un fácil traslado. El prototipo consta de dos cámaras (una caliente y una fría) aisladas mediante una pared modular de XPS que hace las veces de pared y de máscara para poder medir muestras de diferentes dimensiones. El muro modular se introduce entre dos estructuras formadas por cinco paredes de XPS cada una, cuatro de las cuales se encargan de abrazarlo en cada extremo, con el objetivo de minimizar las pérdidas y los efectos de borde que pudieran tener lugar entre las dos cámaras. Las cámaras se mantienen a diferentes temperaturas con la ayuda de un calefactor modelo ReadyWarm 1570 Max (CECOTEC) y una pequeña nevera modelo GrandCooler 20000 SilentCompress (CECOTEC). La nevera se encuentra enclaustrada por su extremo en la pared del fondo con el fin de evitar introducir el foco caliente de esta máquina térmica dentro del montaje. El interior de las cámaras es accesible mediante 4 tapas móviles, dos exteriores (Tapas 1 y 4) y dos "interiores" (Tapas 2 y 3) sobre las que encajan las anteriores. Dentro de cada cámara se encuentra una estructura que monta tres varillas separadas 10 cm entre sí, la primera de ellas separada a su vez 10 cm de la muestra. En esta estructura se alojan los tres termopares encargados de monitorizar la temperatura del aire de la cámara. El diseño principal se recoge en la *Figura 19*, donde se han presentado dos vistas a escala de nuestro prototipo.

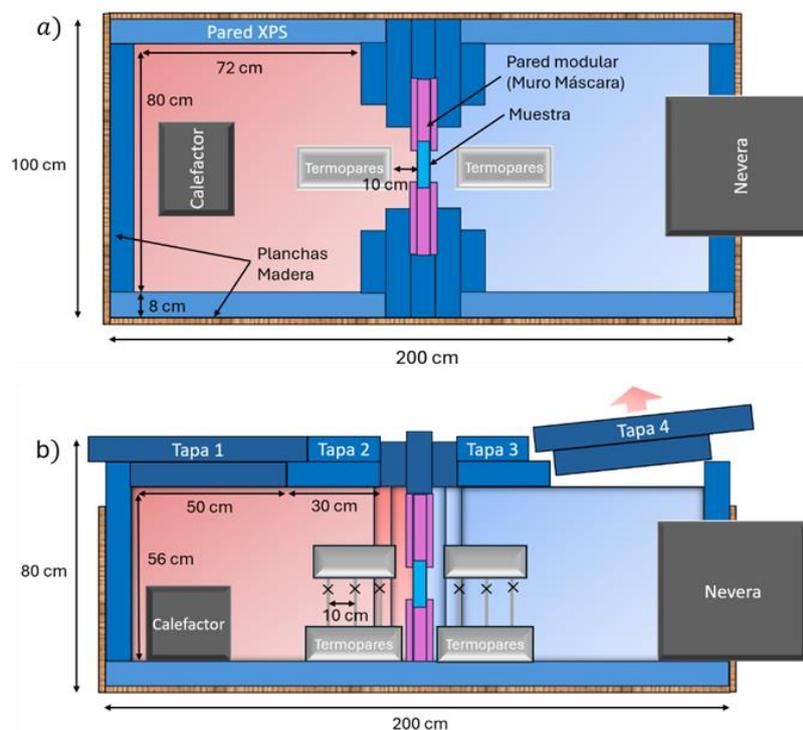


Figura 19. Diseño general a escala del dispositivo: a) Vista superior. b) Vista lateral

3.1.2 Construcción:

El proceso completo de montaje se recoge en la *Figura 20*. En primer lugar, se han instalado las ruedas al palé de madera, constituyendo la base móvil donde se emplaza el equipo y sobre la que se monta el cajeadado externo de madera (mediante juntas metálicas atornilladas que arman la estructura). Posteriormente y con ayuda de una sierra mecánica, se han cortado los paneles de poliestireno expandido a las longitudes adecuadas al montaje, estableciendo un hueco en la estructura donde se encajona el frigo. Las paredes y suelo se han fijado mediante cola de contacto para XPS y han sido cubiertas por aislamiento reflectante pegado a la cara interna con cinta de doble cara. Tras esto, se llevó a cabo la construcción de las estructuras de los termopares y las tapas de encaje hermético, siendo también recubiertas por aislamiento reflectante. Finalmente se emplazaron los sensores, termopares y el equipo externo de adquisición de datos, compuesto por los registradores de datos y por dos portátiles, cada uno encargado de monitorear una cámara del prototipo.

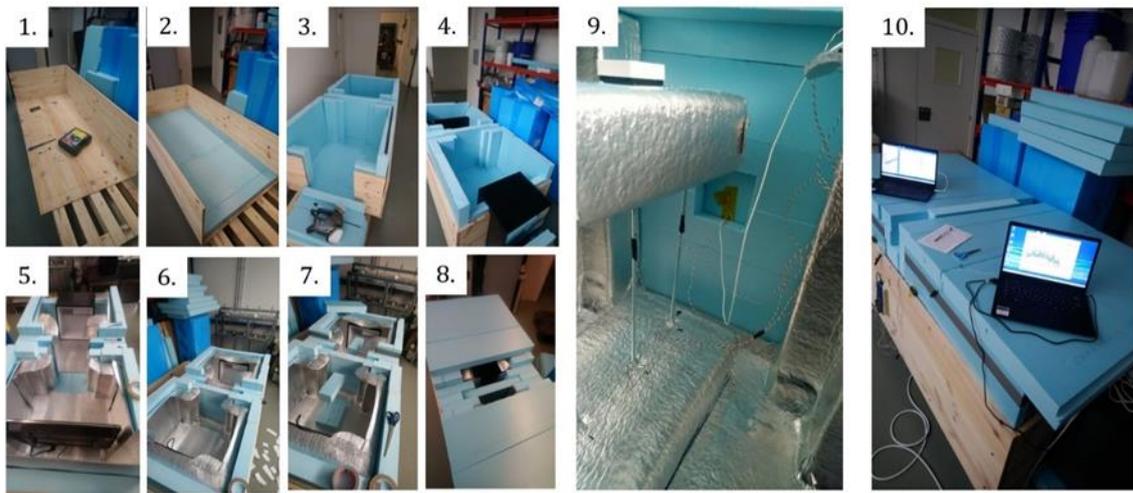


Figura 20. Proceso de construcción: 1. Montaje de la base y cajeadado externo de madera. 2. Colocación del suelo aislante. 3. Construcción y montaje de las paredes de XPS. 4. Fijado de paredes y colocación del frigo y convector. 5. Recubrimiento interno de la estructura con aislamiento reflectante. 6. Fijado del recubrimiento aislante y montaje de la pared separadora. 7. Construcción de las estructuras varilladas que alojan a los termopares. 8. Montaje de las tapas aislantes de encaje hermético. 9. Emplazamiento de los sensores de medida (termopares y sensores de flujo) del aparato y sobre una muestra a ensayo. 10. Equipo externo de medida para controlar flujos y temperaturas de la muestra y cámaras del aparato.

3.2. Muestras a ensayo:

Se han evaluado tres materiales aislantes diferentes: poliestireno extruido (XPS), poliuretano rígido (PUR) y reciclado textil. Las dimensiones de las muestras ensayadas son de $15 \times 15 \text{ cm}^2$ y un espesor de 4 cm . Además, en el caso del XPS, se han elegido otros tres espesores adicionales (1 , 2 y 8 cm), con el fin de observar la tendencia de las propiedades térmicas con el espesor. En el caso del espécimen de 8 cm se ha caracterizado una pared entera (dimensiones $60 \times 56 \text{ cm}^2$) con el objetivo de comprobar la adaptabilidad y posibilidades de la técnica a la hora de ensayar muestras de amplias dimensiones. Las muestras a ensayo se han representado en la *Figura 21*.

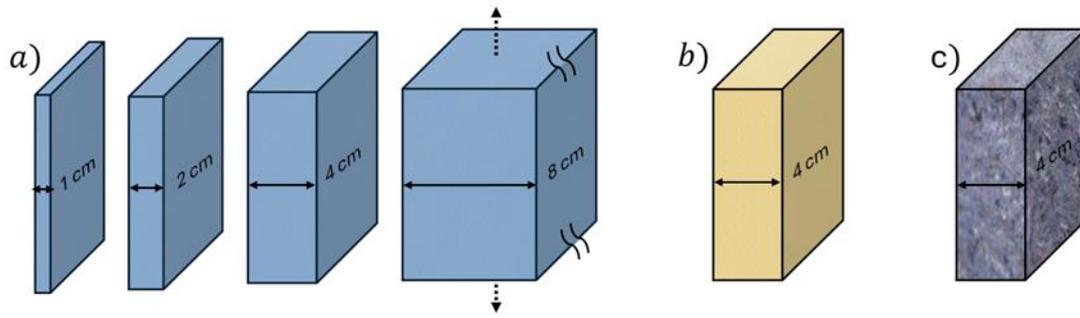


Figura 21. Muestras a ensayo: a) XPS. b) PUR. c) Reciclado Textil.

3.2.1 Configuración de las muestras, sensores y termopares:

Las muestras se encuentran encajadas en un muro que hace las veces de máscara, introducidas 2.5 cm por cada lateral, lo que deja una superficie efectiva de $10 \times 10 \text{ cm}^2$, como se muestra en la Figura 22.a. En cada cara de la muestra (cara fría y cara caliente), se aloja un sensor de flujo de calor y un termopar (fijados con cinta adhesiva kapton de alta transferencia térmica), encargados de monitorear las temperaturas y flujos de calor que atraviesan la muestra. Adicionalmente las estructuras varilladas alojan tres termopares adicionales en cada cámara distando 10 cm entre sí, con el primero de ellos situado a 10 cm de la muestra, estas estructuras se encargan de monitorear la temperatura del aire en cada habitación, como se representa en la Figura 22.b.

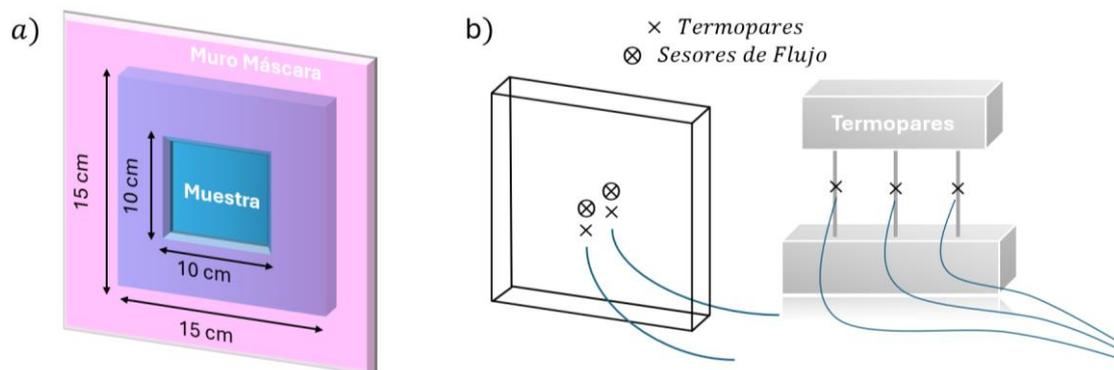


Figura 22. a) Configuración de muestras. b) Emplazamiento de sensores de medida.

3.2.2 Caracterización de las muestras:

a. Densidad:

La densidad de las muestras se ha obtenido mediante el método de densidad aparente de acuerdo a la norma UNE-EN 1602 [66] a partir de medidas geométricas del volumen (V) y la masa (m) de la muestra ($\rho = m/V$).

b. Estructura - microscopía electrónica de barrido (SEM):

Se ha usado microscopía electrónica de barrido (SEM) para visualizar la estructura de las muestras. Para ello, se ha empleado un microscopio electrónico de barrido FlexSEM 1000 VP-SEM. Para poder realizar esta técnica en este equipo, se utiliza un pulverizador catódico (modelo SDC 005, Balzers Union) que permite cubrir las muestras con una fina capa de oro ($\sim 20 \text{ nm}$ de espesor) y hacerlas conductoras.

Las imágenes obtenidas a partir de la microscopía SEM han sido analizadas considerando tamaños de celda y fibras homogéneos por medio de software de análisis de imágenes (ImageJ/FIJI). De esta forma, se ha determinado el tamaño promedio de celdas y el diámetro promedio de fibras ϕ_C y ϕ_F respectivamente, a partir de varias micrografías adecuadas al análisis de estas características. Se han analizado entre 100 y 150 celdas/fibras por muestra.

c. Conductividad térmica:

Se ha utilizado un conductímetro de flujo de calor modelo FOX 200 (TA Instruments) para obtener la conductividad térmica referencia de los materiales bajo estudio. Este mide de acuerdo a las normas ASTM C518 [32] e ISO 8301 [33], siendo el error en la medida menor al 2%. El rango de temperaturas de medida ha sido el mismo que el rango que se obtiene en el prototipo de hot box con fines de efectuar una correcta comparación. En concreto los rangos de medida han sido 25-10°C y 20-10°C correspondientes al primer y segundo estacionario bajo estudio.

3.3. Medidas:

En el desarrollo de las medidas, dos estados estacionarios diferentes han sido seleccionados, cuyos detalles básicos se comentan en el siguiente apartado y que han sido denotados como primer y segundo estacionario respectivamente, atendiendo al orden en el que aparecen en los ciclos de medida.

3.3.1 Ciclos e intervalos de medida elegidos:

En primer lugar, se enciende la nevera al nivel 4 de potencia y se coloca la muestra a caracterizar. Las temperaturas de la cámara fría experimentan cierta oscilación causada por los periodos de actividad del frigo. Los tiempos de ensayo son de aproximadamente 72 horas de duración por cada muestra contando el tiempo de estabilización (24 horas) y de medida (48 horas). La adquisición de datos ha comenzado 2 horas antes al inicio de las medidas. Finalizado este tiempo, se enciende el calefactor al máximo de su potencia hasta alcanzar 50 °C en la cámara caliente (esta forma de perturbar el sistema permite llegar al siguiente periodo de una forma más rápida que si dejáramos estabilizar poco a poco las temperaturas). Tras esto, se programa el termostato de calefactor a 27 °C. De esta manera cuando la temperatura del aire de la cámara calefactada baja de 27 °C, el calefactor se enciende dando un pico de temperaturas. Así, en la cámara caliente se van alternando, durante 22 horas, picos de subida y bajada de temperatura, y cuyo posterior tratamiento da lugar al primer estado estacionario, régimen caracterizado por temperaturas en las superficies de las muestras próximas al intervalo 25-10°C. Finalmente, se apaga el calefactor y se dejan estabilizar las temperaturas hasta que se alcanza de nuevo el equilibrio térmico, constituyendo el segundo estado estacionario de medidas que comprende temperaturas superficiales cercanas al rango 20-10°C.

3.3.2 Medidas de temperaturas y flujos:

Los sensores de temperaturas y flujos han sido establecidos, mediante los correspondientes equipos, para efectuar medidas cada segundo. Esto constituye, debido a la gran duración de los ensayos, una gran cantidad de datos, por lo que, para facilitar su correspondiente tratamiento, estos datos se han filtrado posteriormente seleccionando valores cada cinco segundos.

El control y medida de temperaturas se ha llevado a cabo mediante el conjunto formado por los 8 termopares tipo T y registrador de datos USB TC-08 (Pico Technology). La disposición equiespaciada del equipo de termopares permite obtener un perfil espacial básico de temperaturas en las cámaras y superficies de las muestras.

Por otro lado, las medidas de flujos han sido realizadas mediante la combinación sensor de flujo gSKIN®-XM (greenTEG AG) y registrador de datos gSKIN® DLOG-4219 (greenTEG AG). La calibración del sensor proporcionada por greenTEG AG en el rango de temperaturas -30 a 70 °C, viene dada por una relación lineal donde un factor de corrección S_c da cuenta de la dependencia de la sensibilidad del sensor con la temperatura, de esta forma, para calcular la sensibilidad del sensor a una temperatura T_s se emplea la ecuación (3.1) proporcionada por greenTEG AG.

$$S(T) = S_0 + (T_s - 22,5) \cdot S_c \quad (3.1)$$

Cada uno de los sensores de flujo térmico, sensor en la cara fría (C.F) y sensor en la cara caliente (C.C), presenta factores de corrección (S_0 y S_c) ligeramente diferentes recogidos en la *Tabla 1*.

Tabla 1. Factores de corrección lineal sensores cara fría y cara caliente.

Sensor C.F		Sensor C.C	
S_0 [$\mu V/(W/m^2)$]	3,98	S_0 [$\mu V/(W/m^2)$]	3,96
S_c [$\mu V/(W/m^2)/^{\circ}C$]	0,0050	S_c [$\mu V/(W/m^2)/^{\circ}C$]	0,0049

Para obtener el flujo térmico por unidad de área, es necesario traducir la señal de tensión proporcionada por el sensor a unidades de densidad de flujo de calor, para ello, se debe emplear la ecuación (3.2), donde U representa el voltaje de salida del sensor en μV , y S es la sensibilidad corregida por temperatura del sensor, en $\mu V/(W/m^2)$, obtenida de acuerdo a la ecuación (3.1).

$$q = \frac{Q}{A} = \frac{U}{S} \quad (3.2)$$

3.3.2 Termografía infrarroja:

Atendiendo a realizar un estudio visual de la distribución superficial de temperaturas de la muestra y caracterizar posibles fugas térmicas del sistema, se han realizado una serie de termografías empleando la técnica *IRT* de forma cualitativa para el intervalo térmico correspondiente al primer estacionario. Para ello, se ha usado una cámara térmica modelo FLUKE Ti450 (IR FUSION TECHNOLOGY). Esta cámara cuenta con un sensor infrarrojo de 320×240 *pixels*² (resolución hasta 640×480 *pixels*² con modo SuperResolution). El sensor cubre la banda de 7,5 a 14 micras en el rango espectral infrarrojo, y detecta temperaturas desde -20 °C hasta 1200 °C, con una precisión de ± 2 %. Cada píxel de la cámara comprende un micro-resistor que cambia su resistencia a medida que se calienta debido a la absorción de radiación infrarroja. La electrónica de la cámara transforma estos cambios en la resistencia en una señal térmica representada en el monitor con el que cuenta el equipo. Para las termografías, se utilizó una emisividad de 0.89.

Las imágenes termográficas han sido tratadas con ayuda del software SmartView®, estableciendo tres puntos genéricos de control de temperaturas: que se corresponden con el centro del espécimen, temperatura más baja y temperatura superficial del muro máscara.

4. RESULTADOS:

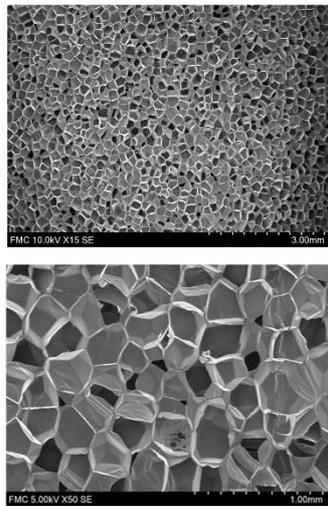
4.1. Caracterización referencia de los materiales a estudio:

Como se muestra en la *Tabla 2*, las muestras bajo estudio han sido caracterizadas de diferentes formas, determinando propiedades como la densidad aparente (ρ), el tamaño promedio de celdas o fibras ($\phi_C // \phi_F$), y la conductividad térmica (λ_t) para los dos rangos térmicos a estudio (25-10°C y 20-10°C). Las muestras de poliestireno extruido (XPS) de espesores (1, 2, 4 y 8 cm), se caracterizan por tener una densidad de aproximadamente 30 kg/m^3 y un tamaño promedio de celda de $212 \mu\text{m}$ (*Figura 22.a*) con conductividades térmicas de 35,5 y $34,9 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$ para los respectivos rangos térmicos analizados. Por su parte el PUR cuenta con densidades cercanas a los 35 kg/m^3 , tamaños de poro de $232 \mu\text{m}$ (*Figura 22.b*) y conductividades térmicas de 27,9 y $27,3 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$. Finalmente, el reciclado textil presenta una densidad de 41 kg/m^3 , con estructuras compuestas por fibras de diámetros promedio de $17 \mu\text{m}$ (*Figura 22.c*) y conductividades que rondan los $35 - 36 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$.

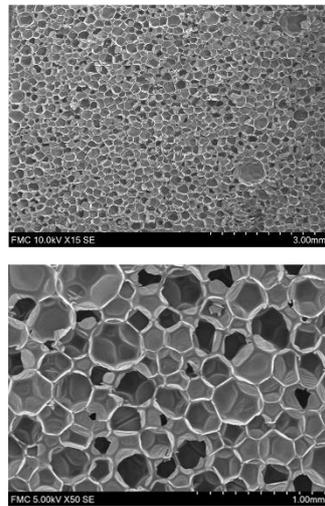
Tabla 2. Caracterización estructural y térmica referencia de los diferentes materiales a ensayo.

Materiales	ρ [Kg/m ³]	$\phi_C // \phi_F$ [μm]	λ_t (25-10 °C) [mW/(m·K)]	λ_t (20-10 °C) [mW/(m·K)]
XPS	$30,0 \pm 0,4$	212 ± 61	35,5	34,9
PUR	$34,5 \pm 0,1$	232 ± 80	27,9	27,3
Textil	$41,2 \pm 0,5$	17 ± 5	36,5	35,7

a) XPS



b) PUR



c) Textil

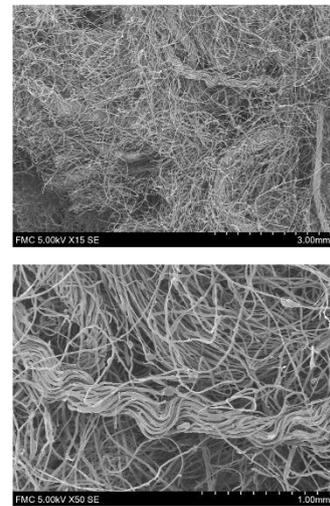


Figura 23. Microscopías de SEM a diferentes magnificaciones: a) XPS. b) PUR. c) Reciclado Textil.

4.2. Metodología:

A la hora de establecer una metodología consistente de trabajo, es necesario identificar los periodos o regiones más afines a los objetivos de este proyecto, siendo pertinente tener una vista global del conjunto de valores obtenidos. La toma de datos es de aproximadamente 48 horas por material. En la *Figura 24* se representan todos los datos adquiridos en función del

tiempo para la muestra de XPS de 4 cm de grosor, espécimen que se va a usar como referencia a la hora de sentar las bases de esta metodología. Las magnitudes representadas son: la temperatura de la cara caliente de la muestra T_c , temperatura de la cara fría T_f y los flujos térmicos por unidad de area Q_c y Q_f , en la superficie caliente y fría respectivamente. La adquisición de datos comienza 24 horas después del montaje del espécimen a ensayo, con un periodo de estabilidad previo, como se observa en la *Figura 24*, régimen seguido del pico térmico de 45 °C en T_c , donde comienza realmente el periodo de ensayos y donde se han seleccionado dos regiones diferentes, la primera de ellas se caracteriza por los ciclos térmicos del calefactor (para la que se han enfocado 3 ciclos térmicos), el tratamiento de datos para esta región implica filtrar valores entre ciclos que, una vez filtrados, constituyen en su conjunto el primer estacionario de medida. Al final de esta primera región (*Figura 24*), se ha tomado una termografía desde la cámara caliente del prototipo. La segunda región a estudio y ensayo de propiedades sucede después de haber apagado el calefactor, régimen de estabilización donde se alcanza el equilibrio térmico, en esta región solo el frigo permanece encendido y su posterior tratamiento constituye el segundo estacionario de medidas.

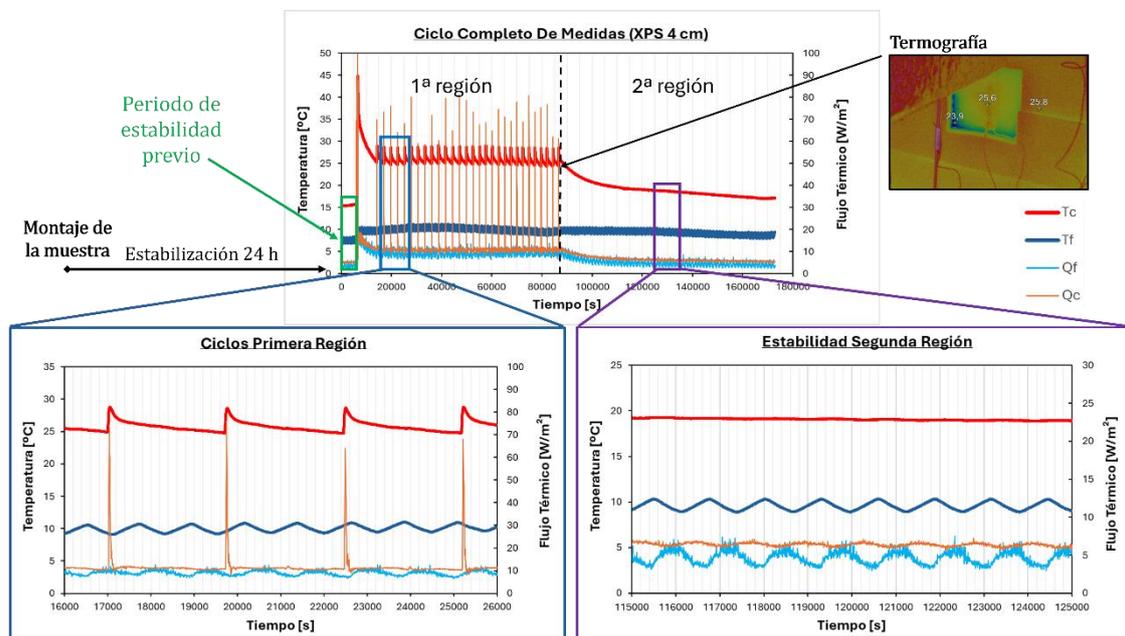


Figura 24. Ciclo de 48 horas de medida y regiones susceptibles al tratamiento (muestra de XPS 4 cm).

En el siguiente apartado se ha llevado a cabo el tratamiento y análisis de este conjunto de datos con el fin de establecer un procedimiento genérico para abordar las diferentes regiones seleccionadas en el resto de muestras a ensayo.

4.2.1 Análisis y tratamiento (XPS 4 cm):

a. Primer estacionario:

Los resultados de las medidas correspondientes a los ciclos térmicos en los que el calefactor se encuentra encendido han sido tratados aplicando un filtro sobre las temperaturas de la superficie caliente de la muestra (T_c). En particular, los datos se han filtrado en rangos de temperatura con 1 °C de margen, que abarcan los últimos valores de cada uno de los ciclos. Una vez filtrados, estos datos constituyen el primer estacionario de medidas, periodo donde se alternan medidas de día y noche, tal y como se muestra en la *Figura 25*.

Primer Estacionario (XPS 4 cm)

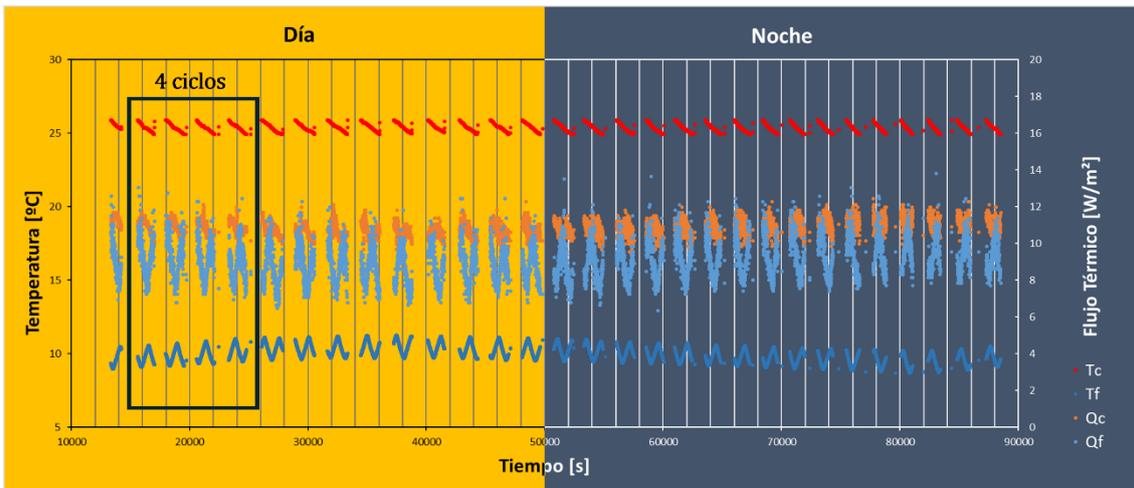


Figura 25. Periodo diurno y nocturno en el primer estacionario de medidas (muestra de XPS 4 cm).

En primer lugar, cualitativamente, se observa que durante el día las temperaturas de la muestra en la cámara fría aumentan, mientras que durante la noche disminuyen. Estas variaciones se deben a que las temperaturas de la sala laboratorio bajan durante el periodo nocturno (al apagarse la calefacción del edificio). Como resultado, en el computo global de medidas, no contamos con la situación ideal de un ambiente externo de temperatura controlado. Por este motivo, y en primer lugar, se ha analizado si este hecho afecta en gran medida al sistema. Para ello, se han tratado de forma independiente los datos correspondientes al periodo diurno y nocturno de medidas, centrándonos en los dos regímenes que mayores diferencias presentan entre sí. De esta forma se han elegido intervalos de aproximadamente 20000 segundos en torno a los valores máximo y mínimo de temperaturas de la cámara frigorífica, a fin de comparar los resultados obtenidos para ambos periodos. Además, en segundo lugar, y con el objetivo de optimizar el tiempo de duración de los ensayos, se ha incluido en esta comparación un régimen adicional constituido por cuatro de los primeros cinco ciclos del calefactor (el primero de ellos ha sido considerado como un ciclo de transición ya que corresponde al final de la bajada desde el pico máximo de temperatura, razón por la que ha sido obviado) como se observa en la *Figura 25*. En los tres regímenes analizados se han comparado las temperaturas, los flujos y la conductividad térmica resultante (*Figura 26*). La conductividad térmica se ha calculado para cada conjunto de datos de temperaturas y flujos. Dado que hemos dispuesto sensores a ambos lados de la muestra, se obtienen valores de flujo térmico en la superficie fría Q_f y superficie caliente de la muestra Q_c . La conductividad se obtiene para la media de cada par de valores de flujos (Q_f y Q_c), calculándose la conductividad total promedio de la muestra (λ_t). En la comparación de conductividades se ha añadido además el valor referencia ($35,5 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$) obtenido al caracterizar el XPS mediante la técnica *HFM* para este primer intervalo térmico, viéndose valores muy diferentes a los obtenidos para el prototipo *HB*, resultados que se discutirán más adelante.

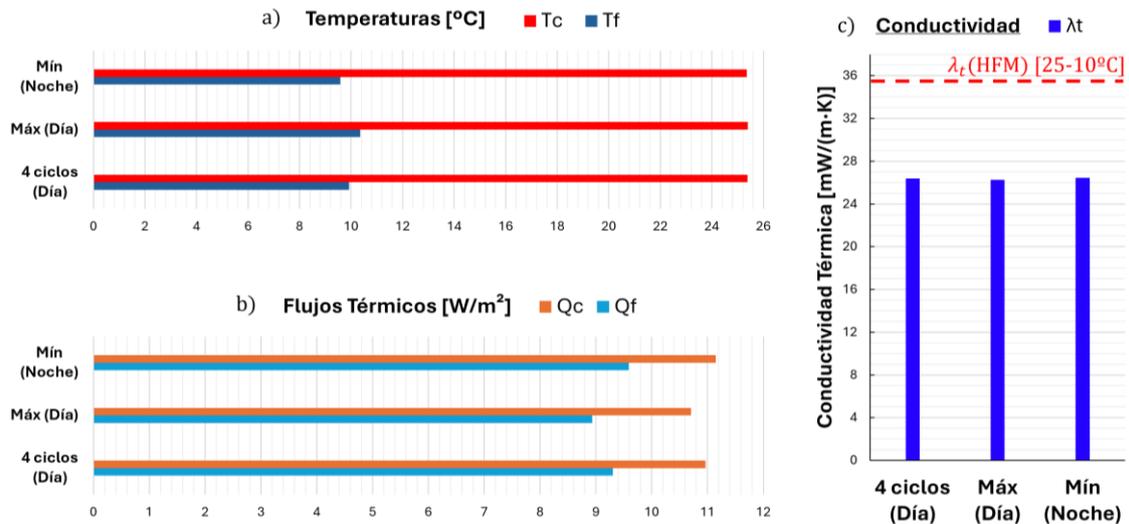


Figura 26. Comparación de resultados para tres regímenes diferentes situados en el primer estacionario de medidas: a) Temperaturas. b) Flujos térmicos. c) Conductividad térmica total.

En la comparación de resultados para estos tres regímenes, se encuentran en primer lugar las temperaturas de la superficie caliente de la muestra, con resultados prácticamente idénticos de aproximadamente 25 °C (ya que se han filtrado en rangos entre 24,9 y 25,9 °C para T_c). En segundo lugar se tienen las diferencias de T_f , con valores promedio de 10,4 °C para el periodo diurno y 9,6 °C para el periodo nocturno (diferencias de aproximadamente un 7 %). Por otro lado el promedio de T_f de los 4 ciclos se sitúa prácticamente entre las regiones mínima y máxima, constituyendo una situación intermedia de temperaturas. En cuanto a los flujos térmicos, se encuentran variaciones entre 10-11 W/m^2 para el sensor situado en la superficie caliente y 8-9 W/m^2 para el sensor situado en la superficie fría. Además, cabe destacar, que los flujos siguen una tendencia opuesta a las temperaturas, siendo superiores en el periodo nocturno. Esto se debe a que el flujo de calor ha de aumentar al incrementarse el gradiente de temperatura, dado que la conductividad térmica del material en estos intervalos es prácticamente constante. Esto se observa a la hora de la comparación de conductividades térmicas totales donde se tienen valores de aproximadamente 26,3 y 26,4 $mW/(m \cdot K)$, variaciones que suponen diferencias de menos del 1 % entre regímenes máximo y mínimo. Este rango entra dentro de la desviación estandar de la conductividad térmica total, valores que rondan el 1 $mW/(m \cdot K)$ e implican desviaciones cercanas al 3 % para el promedio.

En consecuencia, y a pesar de las diferencias de temperatura en la cámara frigorífica, nos encontramos con regímenes prácticamente equivalentes dado que los valores de temperatura y flujo de calor se compensan para dar conductividades térmicas similares. Este hecho hace factible restringirnos a regímenes más cortos, factor que supone una optimización considerable en la duración de los ensayos, uno de los objetivos del desarrollo de esta metodología. Por ello, en las siguientes secciones, los datos y resultados presentados para el primer estacionario de medidas, se atribuyen al régimen de cuatro ciclos térmicos del calefactor, periodo de aproximadamente 3 horas de duración comenzando tras el primer ciclo de transición. Con una duración total de aproximadamente 30 horas (24 + 3 horas de estabilización y 3 horas de medida) para los ensayos del primer estacionario.

b. Segundo estacionario:

Los datos correspondientes a la segunda región (cuya estabilidad térmica se alcanza cerca de 7 horas después del apagado del calefactor) han sido filtrados en tiempos en vez de temperaturas, en rangos que abarcan aproximadamente 10000 segundos, lo que equivale a unos 2000 puntos

(un punto cada cinco segundos). Estos valores componen el segundo estacionario con tiempos de adquisición efectiva de aproximadamente 10 horas (7 de estabilización y tres de medida) después de la finalización del primer estacionario.

Respecto al cálculo de la conductividad, se ha seguido un proceso análogo al apartado anterior donde se han obtenido valores para cada conjunto de datos. Obteniendo la conductividad resultante a partir del promedio. Los valores de temperaturas, flujos y conductividad térmica, para este periodo, se presentan en la *Figura 27*. Con resultados de $19,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $9,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, y flujos térmicos de $6,4$ y $4,6\text{ W/m}^2$, entre la cara caliente y fría de la muestra, con una conductividad resultante de $23,9\text{ mW/(m}\cdot\text{K)}$. De forma análoga al anterior apartado, se ha representado la conductividad térmica referencia ($34,9\text{ mW/(m}\cdot\text{K)}$) obtenida para el XPS en este segundo intervalo térmico. Resultados que se comentarán en el siguiente apartado junto con los del primer periodo estacionario.

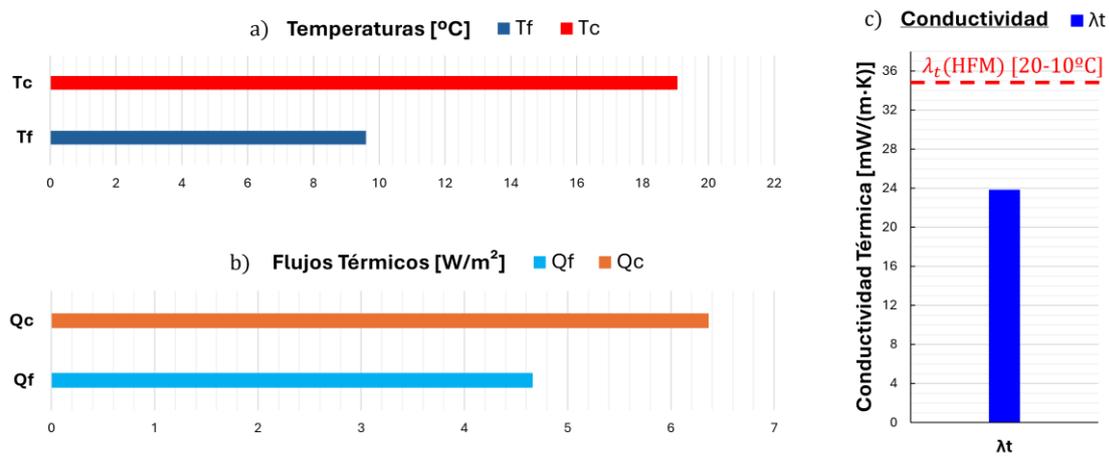


Figura 27. Resultados para el en el segundo estacionario de medidas para el XPS de 4 cm de grosor: a) Temperaturas. b) Flujos Térmicos. c) Conductividad térmica total.

c. Calibración:

Se ha visto que los resultados obtenidos para la conductividad térmica en el primer y segundo estacionario para el XPS de 4 cm muestran valores en torno a los 26 y 24 $\text{mW/(m}\cdot\text{K)}$ respectivamente. Sin embargo, los valores referencia caracterizados mediante *HFM* para este material, se encuentran aproximadamente entre los 36 y 34 $\text{mW/(m}\cdot\text{K)}$. De esta forma y de acuerdo con trabajos anteriores [38] queda claro que los resultados de los sensores han de ser recalibrados a fin de obtener valores representativos y precisos. Por ello, se ha calculado un factor de corrección adimensional γ , que da cuenta de la relación entre la conductividad total obtenida mediante la técnica de *HB* para la muestra de XPS de 4 cm y su conductividad de referencia, para poder obtener una conductividad total corregida λ_t^* (*Figura 28*). Para el primer periodo estacionario se ha determinado un factor de corrección γ de aproximadamente 1,34 mientras que en el segundo estacionario de medidas se tiene un valor aproximado de 1,41 para este parámetro.

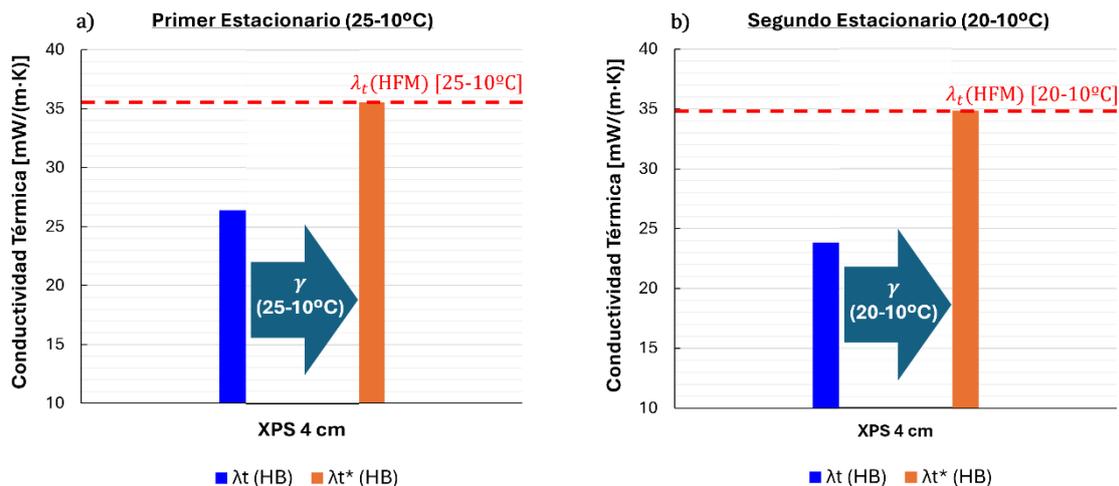


Figura 28. Corrección de conductividades térmicas para la muestra de XPS de 4 cm usando el valor referencia de conductividad térmica en HFM: a) Comparación primer estacionario. b) Comparación segundo estacionario de medidas.

4.3 Validación de la metodología:

4.3.1 Diferentes espesores de XPS:

Para observar la dependencia de las variables fundamentales medidas y comprobar si nuestro prototipo es capaz de obtener resultados concordantes y precisos para un mismo material al variar el grosor de la muestra, se han llevado a cabo ensayos equivalentes que involucran tres muestras adicionales de diferentes espesores de XPS, dos de pequeñas dimensiones (1 y 2 cm de espesor), y una tercera de grandes dimensiones (pared de 8 cm de grosor). Los resultados han sido comparados con el espécimen de pequeñas dimensiones (XPS de 4 cm), a fin de validar la metodología de medida establecida para esta muestra.

a. Primer estacionario:

Las medidas correspondientes a los cuatro ciclos para los diferentes espesores de XPS durante el primer estacionario de medidas, han sido recogidas en la *Figura 29*, rangos que abarcan cerca de tres horas de ensayo. En los gráficos se puede observar cierta tendencia en las medidas, ejemplo de ello es la reducción de los flujos térmicos al aumentar el espesor de los especímenes, empezando por aproximadamente $25 \text{ W}/\text{m}^2$ medidos para el espécimen de 1 cm y finalizando por los $4\text{-}5 \text{ W}/\text{m}^2$ obtenidos para la pared de XPS de 8 cm. También se observa cierta variación de las temperaturas superficiales de las muestras, amplitudes térmicas que crecen desde unos 13 °C hasta 16 °C , hecho relacionado con la transmitancia térmica y por el cual cuanto mayor es la capa de material, mayor será su capacidad para aislar y mantener rangos mayores de temperatura superficial.

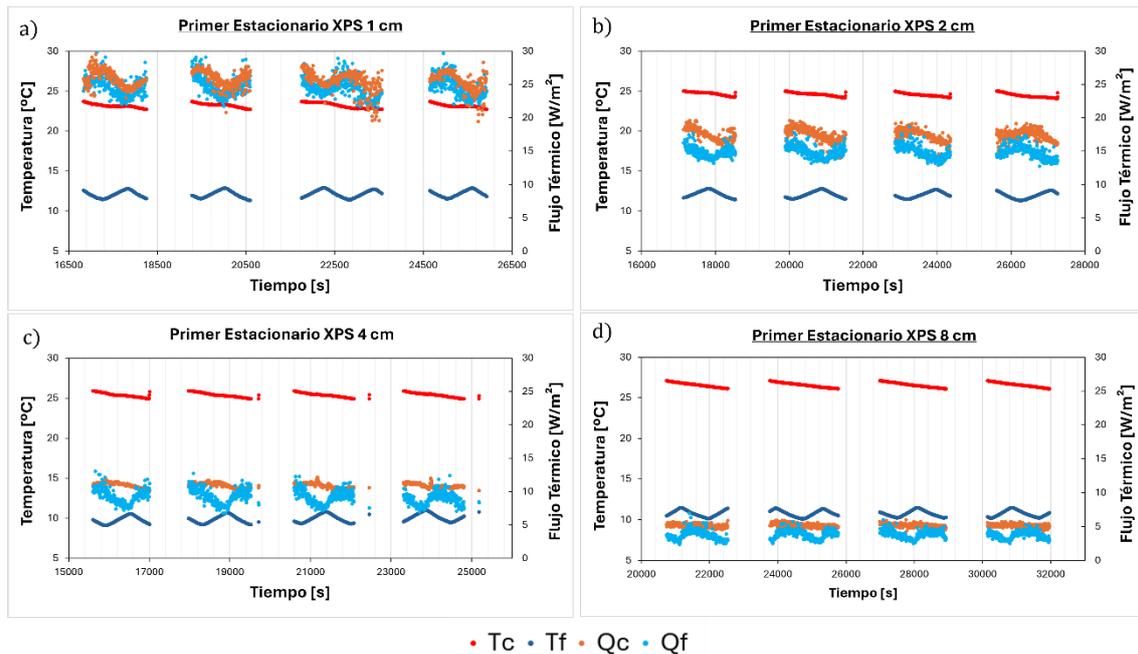


Figura 29. Gráficos de medidas para el primer estacionario y diferentes muestras de XPS: a) XPS 1 cm. b) XPS 2 cm. c) XPS 4 cm. d) XPS 8 cm.

Por otro lado, el emplazamiento de los termopares permite un estudio espacial de la distribución de temperaturas entre las cámaras del prototipo, de esta manera se ha representado la localización de cada uno de los termopares con el símbolo \times , acorde a los anteriores apartados, partiendo del origen de distancias situado en la intersección física entre cámaras caliente y fría. La *Figura 30.a* da cuenta de la situación global, mientras que, en la *Figura 30.b* se ha puesto el foco en los termopares alojados en las superficies de cada muestra.

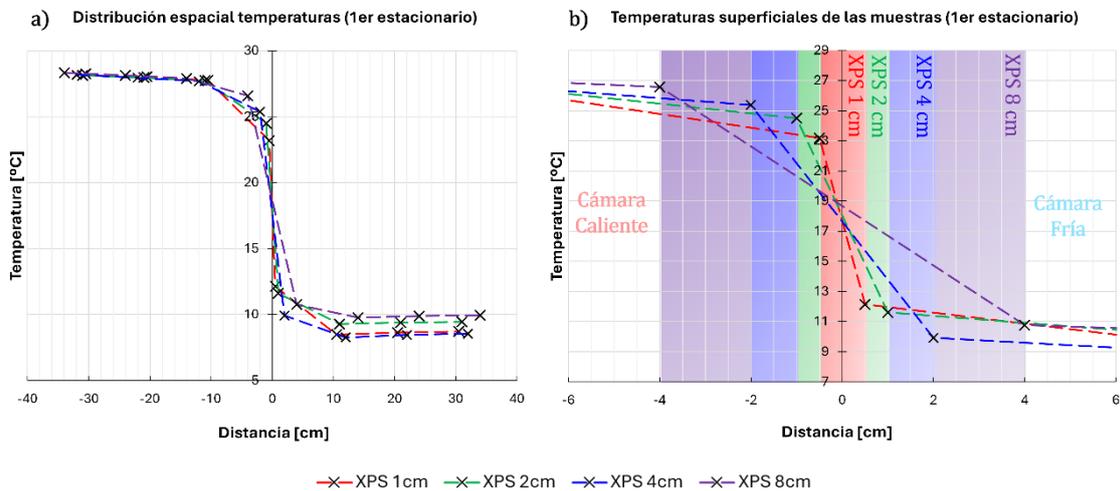


Figura 30. Perfil de temperaturas del primer estacionario para diferentes espesores de XPS: a) Distribución espacial de termopares y temperaturas. b) Temperaturas superficiales de los especímenes a ensayo.

Por último, en la *Figura 31* se presentan las imágenes termográficas correspondientes a los diferentes espesores de XPS, donde las temperaturas superficiales muestran valores concordantes con los gráficos presentados en la figura anterior. Para los especímenes de pequeñas dimensiones se observan fugas térmicas que se filtran a través de los bordes de la estructura que conforma el muro máscara, encargado de abrazar la muestra por sus extremos.

Estas se ven reducidas en magnitud a medida que aumenta el grosor del espécimen, por ejemplo, para la muestra de 1 cm se tienen diferencias de casi 4 °C, siguiendo de aproximadamente 3 °C para el de 2 cm, y cerca de 2 °C para el de 4 cm. Finalmente, es importante remarcar que este hecho apenas afecta a las medidas de conductividad dado que tanto los sensores de flujo como de temperatura se sitúan en un área interna alejada de estas regiones laterales.

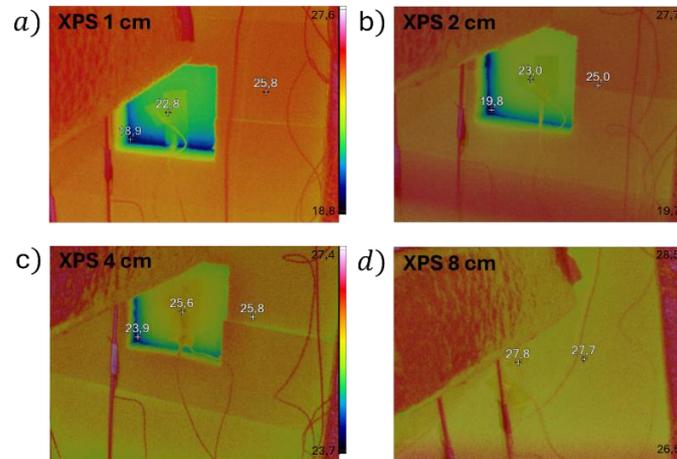


Figura 31. Termografías para diferentes muestras de XPS: a) XPS 1 cm. b) XPS 2 cm. c) XPS 4 cm. d) Pared de XPS 8 cm.

b. Segundo estacionario:

Los gráficos pertenecientes al segundo periodo estacionario para los diferentes grosores de XPS se recogen en la Figura 32. En este caso las medidas se presentan como un continuo de datos de casi tres horas de duración, periodo donde se observa de manera más precisa la influencia de la oscilación de temperaturas de la cámara frigorífica y su repercusión directa en los valores de flujo térmico, valores que tienden a aumentar en los mínimos (mayor amplitud térmica) y disminuir en los máximos del frío.

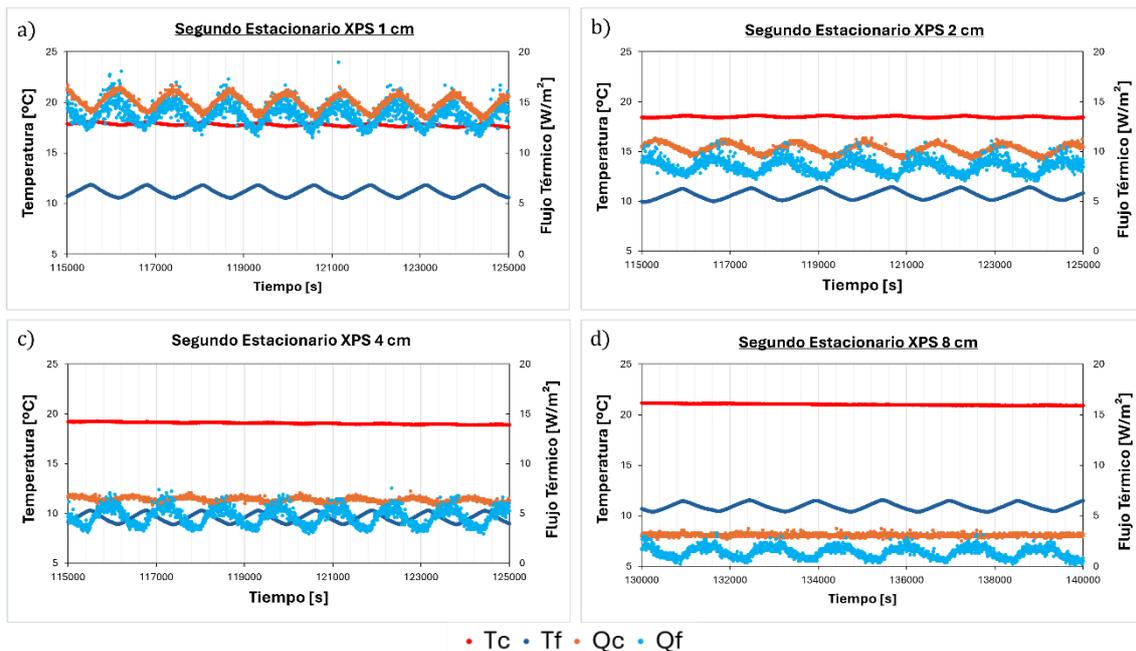


Figura 32. Gráficos de medidas para el segundo estacionario y diferentes muestras de XPS: a) XPS 1 cm. b) XPS 2 cm. c) XPS 4 cm. d) XPS 8 cm.

Durante este segundo periodo estacionario se tienen menores amplitudes térmicas entre cámaras (Figura 33.a), mientras que las temperaturas superficiales de las muestras mantienen tendencias similares con el grosor (Figura 33.b).

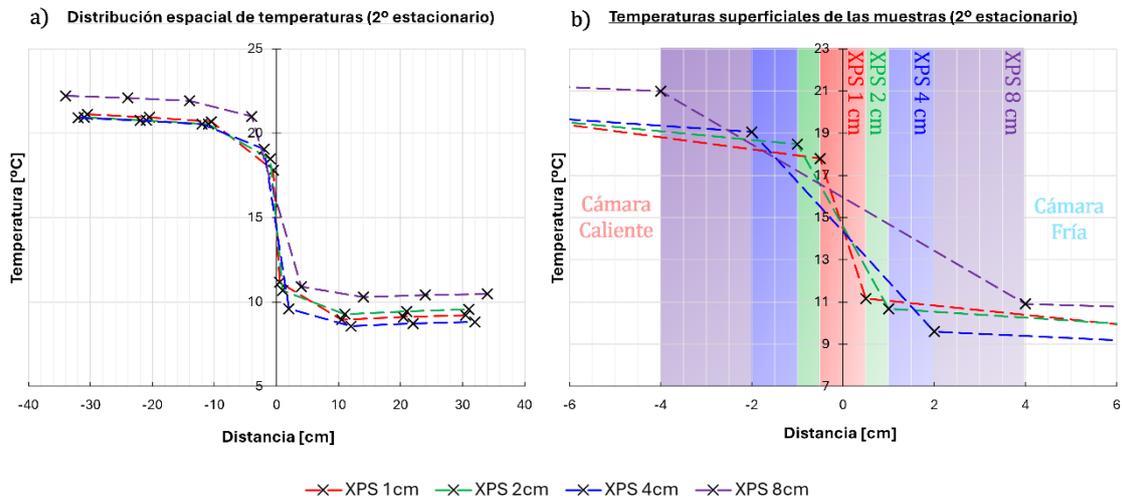


Figura 33. Perfil de temperaturas del segundo estacionario para diferentes espesores de XPS: a) Distribución espacial de termopares y temperaturas. b) Temperaturas superficiales de los especímenes a ensayo.

c. Conductividad térmica:

Los resultados para las conductividades térmicas promedio de cada espécimen para el primer y segundo intervalo estacionario de medidas se han presentado en la Figura 34. En ella se han representado los valores totales y corregidos para el prototipo *HB*, acorde a la calibración obtenida para la muestra referencia (XPS 4 cm), además se ha incluido en cada régimen la conductividad térmica del XPS medida en el equipo *HFM*.

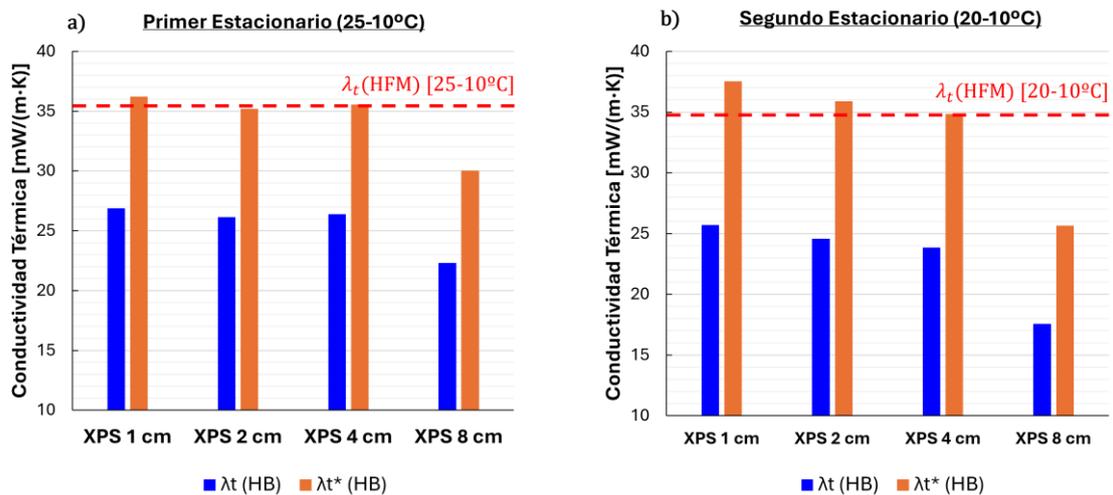


Figura 34. Comparación de conductividades térmicas para diferentes espesores de XPS: a) Primer estacionario. b) Segundo estacionario.

En esta comparación se observa como para los especímenes de pequeñas dimensiones, que constituyen las muestras de 1, 2 y 4 cm de grosor, se obtiene un buen acuerdo con la técnica *HFM*. En particular, la precisión de la calibración aumenta con el rango de temperatura, donde para la muestra de XPS de 1 cm, se encuentran conductividades térmicas de aproximadamente

36,2 y 37,5 $mW/(m \cdot K)$ con errores relativos próximos al 3 y 8 % para el primer y segundo estacionario respectivamente, mientras que la muestra de 2 cm exhibe un mayor acuerdo con valores de 35,2 y 35,9 $mW/(m \cdot K)$ para el primer y segundo intervalo térmico, con errores relativos inferiores al 1 % y cercanos al 3 % respectivamente. Finalmente, la muestra de amplias dimensiones (pared completa de 8 cm), presenta valores de conductividad muy por debajo del valor referencia para el XPS, resultados de 30 y 25,7 $mW/(m \cdot K)$ en los respectivos intervalos térmicos analizados, cifras que suponen errores relativos del 16 y 26 % de forma respectiva. Estos altos errores se deben a la sensibilidad por unidad de área de los sensores ($< 0,41 W/m^2$) y el significativo grosor del espécimen. Este hecho se puede apreciar en la *Figura 29.d* y la *Figura 32.d* donde se obtienen flujos térmicos por debajo de los $4 W/m^2$.

Finalmente es importante remarcar que los propios sensores presentan un error en la medida del 3 %, y que se han obtenido errores relativos del 3 % (para el primer intervalo térmico), cifras equivalen a errores absolutos de aproximadamente $1 mW/(m \cdot K)$ en el rango de conductividades en el que se trabaja (alrededor de los $35 mW/(m \cdot K)$).

4.3.2 Diferentes materiales:

Con el fin de validar la técnica para diferentes aislantes térmicos, se han seleccionado dos materiales adicionales diferentes (PUR y reciclado textil) con espesores de 4 cm.

a. Primer estacionario:

Los gráficos pertenecientes al primer periodo estacionario para el PUR y reciclado textil se recogen en la *Figura 35*. Ensayos en los que ambos materiales presentan valores similares, con flujos térmicos que se encuentran entre $5-10 W/m^2$ y promedios que rondan los $8 W/m^2$, mientras que las temperaturas superficiales de la cara caliente son algo superiores para el PUR.

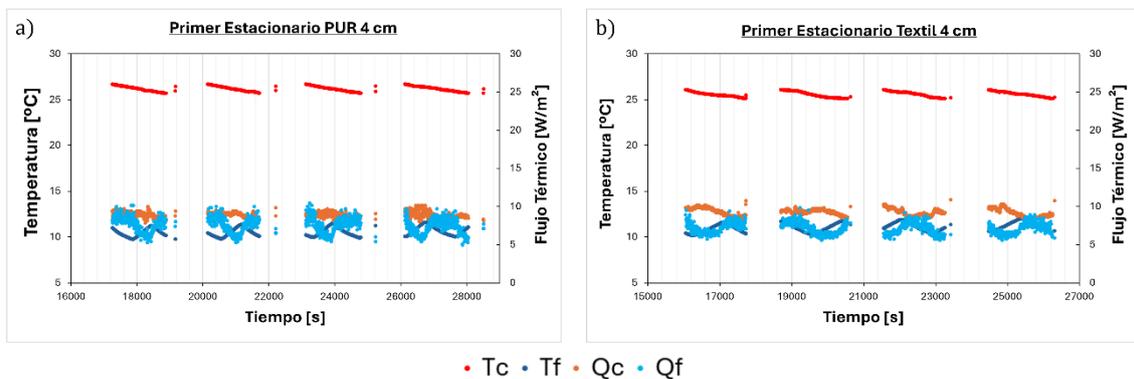


Figura 35. Gráficos del primer estacionario para diferentes materiales: a) PUR 4 cm. b) Textil 4 cm.

Por otro lado, se ha presentado la distribución espacial de temperaturas de las muestras y cámaras del dispositivo, incluyendo la muestra de XPS. En ella los tres materiales exhiben comportamientos similares de temperaturas para los diferentes termopares. Las temperaturas promedio del aire rondan los $27 ^\circ C$ para la cámara caliente (cifras algo superiores para el PUR) y cerca de $9 ^\circ C$ para la cámara fría (*Figura 36.a*), mientras que las temperaturas en las superficies de los materiales se sitúan en torno a los $25-26$ y $10-11 ^\circ C$ respectivamente (*Figura 36.b*).

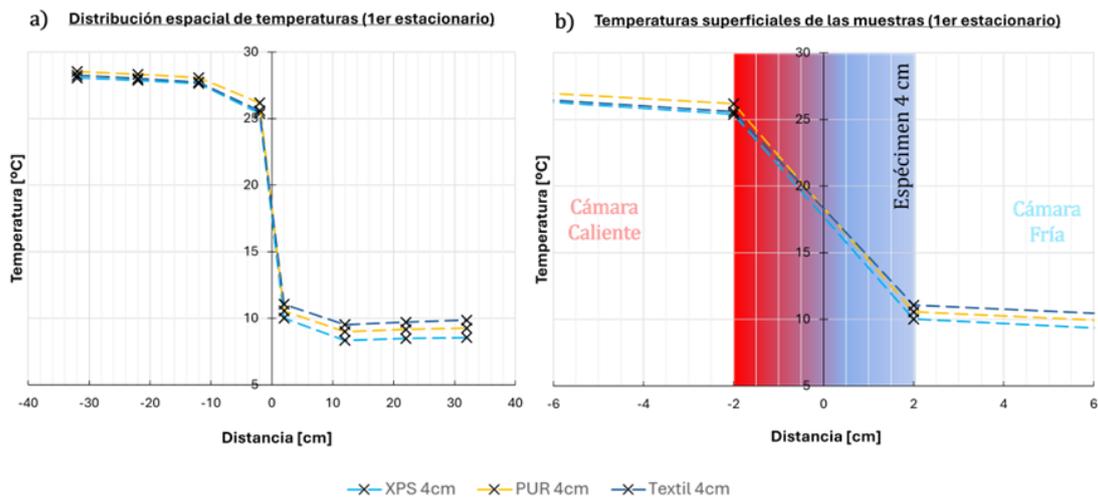


Figura 36. Perfil de temperaturas del primer estacionario para diferentes materiales de espesor fijo (4 cm): a) Distribución espacial de termopares y temperaturas. b) Temperaturas superficiales de los especímenes a ensayo.

Finalmente, se presentan las termografías para el último ciclo térmico de los tres materiales (Figura 37), en este caso se observan mayores temperaturas superficiales para el PUR, hecho que concuerda con sus bajos valores de conductividad térmica, seguido del XPS, material con conductividades algo superiores, y terminando con el reciclado textil, con las menores temperaturas superficiales.

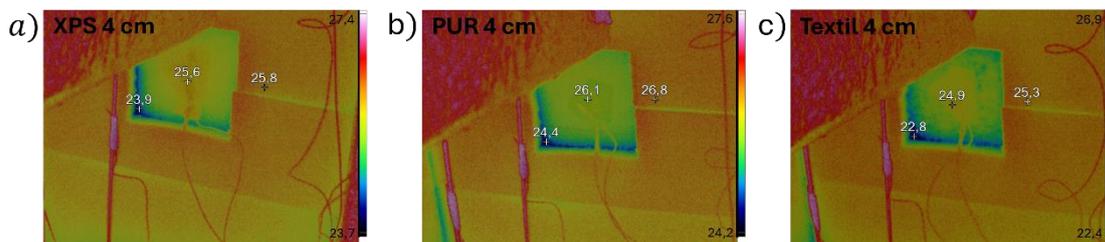


Figura 37. Termografías para diferentes materiales de espesor 4 cm: a) XPS. b) PUR. c) Textil.

b. Segundo estacionario:

Los gráficos del segundo estacionario para el PUR y reciclado textil se presentan en la Figura 38. Ensayos donde se observan flujos térmicos que rondan los 5 W/m^2 para los dos materiales, con una temperatura superficial T_c algo superior para el PUR.

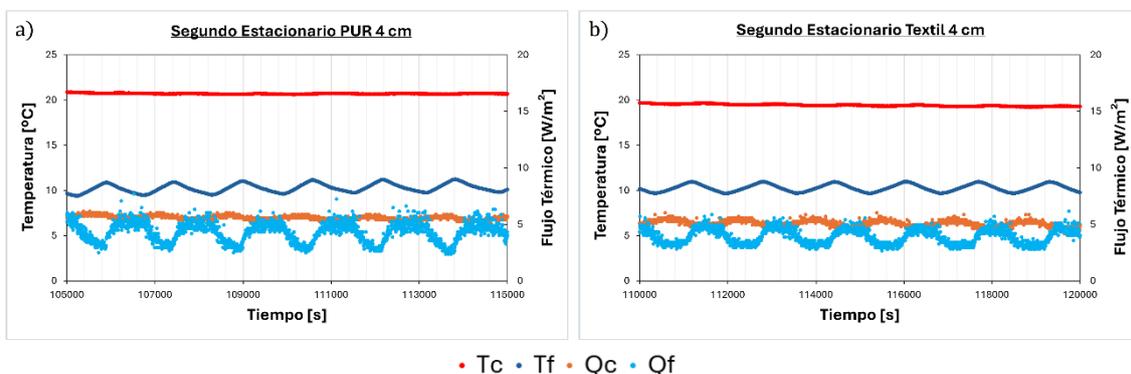


Figura 38. Gráficos del segundo estacionario para diferentes materiales: a) PUR 4 cm. b) Textil 4 cm.

El perfil de temperaturas se recoge en la *Figura 39*, gráficos donde se aprecia, en mayor medida, la capacidad del poliuretano para mantener el calor dentro de la cámara caliente (con valores cerca de 2 °C por encima del resto de materiales), razón por la que presenta la mayor amplitud térmica entre cámaras, seguido del XPS y finalizando con el reciclado textil, con valores muy próximos.

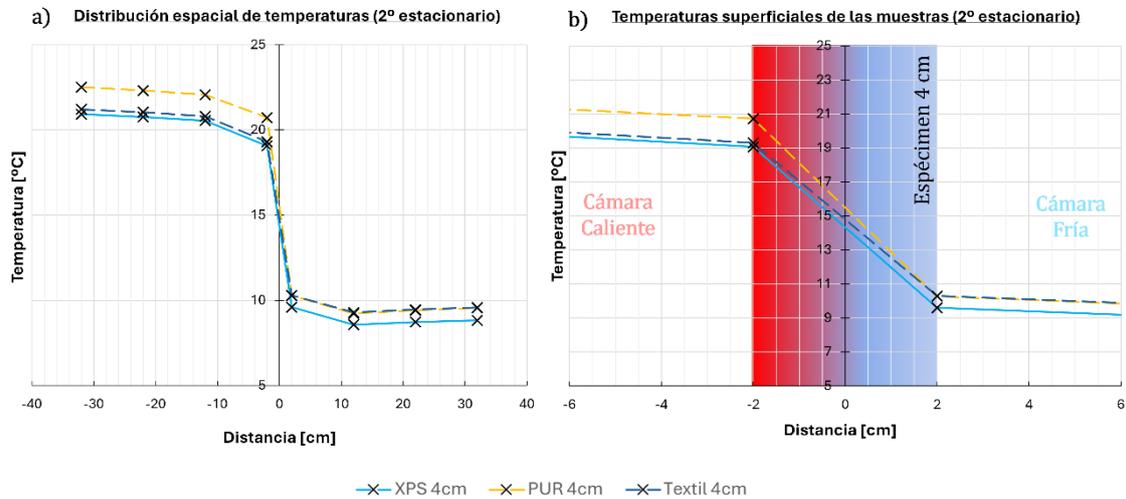


Figura 39. Perfil de temperaturas del segundo estacionario para diferentes materiales: a) Distribución espacial de termopares y temperaturas. b) Temperaturas superficiales de los especímenes a ensayo.

c. Conductividad térmica:

En este apartado se recogen los resultados correspondientes a los dos periodos estacionarios para los tres materiales (*Figura 40*), empleando la corrección de sensores obtenida para la muestra de XPS, valores representados y comparados (mediante el cálculo de errores relativos) con las conductividades térmicas obtenidas para la técnica *HFM*.

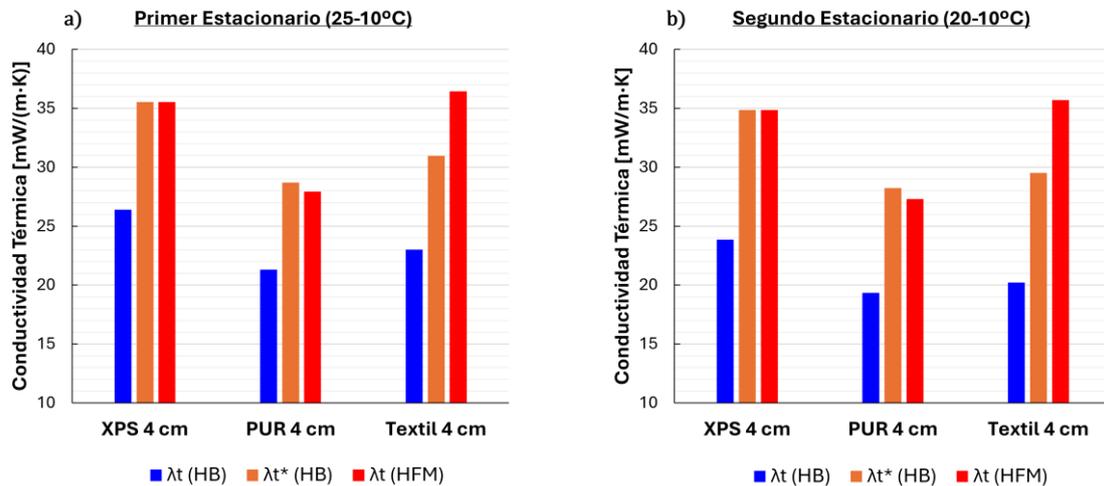


Figura 40. Corrección y comparación de conductividades térmicas para diferentes materiales, usando como referencia la muestra de XPS: a) Primer estacionario. b) Segundo estacionario.

En este caso la precisión de la calibración empleada es prácticamente la misma para los dos intervalos térmicos estudiados, con resultados donde se observa la tendencia de la conductividad con la amplitud térmica. En particular, para la espuma de poliuretano rígida (PUR) se han obtenido valores de aproximadamente 28,7 y 28,2 $mW/(m \cdot K)$ con errores relativos que rondan el 3 % para el primer y segundo intervalo térmico, por otro lado, para el reciclado

textil se tienen resultados de aproximadamente $29,5$ y $30,9 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$ con errores significativos entre el 15 y 17 %, este hecho se puede atribuir a la estructura a base de fibras que presenta el material, factor que supone un pobre contacto muestra-sensores dentro del prototipo de *HB*. De esta forma, para analizar materiales a base de fibras sería necesario mejorar el contacto entre la superficie de la muestra y los sensores, o bien aplicar una corrección particular para este tipo de materiales, siendo necesario ensayar otros tipos de aislantes a base de fibras a fin de evaluar la tendencia que presentan este tipo de estructuras.

4.4 Estudio gráfico orientado al ensayo de propiedades dinámicas:

En este último apartado hemos decidido adoptar un enfoque diferente aprovechando la oscilación prácticamente armónica de temperaturas en la cámara frigorífica. En un ambiente externo realista las condiciones de temperatura varían con el tiempo. De esta manera, en una primera aproximación, se puede considerar que las temperaturas externas oscilan de forma periódica, partiendo de esto, se pueden establecer nuevos parámetros que dan cuenta del comportamiento de los diferentes materiales ante este tipo de condiciones. Si consideramos una onda de cierta amplitud térmica (pico-pico) en la superficie fría de la muestra (homogénea), que se transmite a la otra cara de la muestra, la onda se verá atenuada y desfasada en tiempos a medida que atraviese el material, esta atenuación y desfase dependerá esencialmente de tres factores: la distancia que deba recorrer dentro del material (grosor d de la muestra), la facilidad con la que lo haga (conductividad térmica λ), y el calor específico de la muestra [67]. Es importante destacar la utilidad de estos parámetros ya que ofrecen una visión alternativa bajo condiciones más realistas [68]. La capacidad aislante de un material bajo estas condiciones estará, por tanto, relacionada con la medida en que este es capaz de atenuar y retardar la variación externa de temperatura. Para apreciar estos factores se han representado las temperaturas de cada superficie de la muestra (T_c y T_f) en distintitos ejes coordenados a fin de observar la pequeña variación que experimenta T_c con la variación de T_f , este estudio ha sido realizado en intervalos de estabilidad pertenecientes al segundo estacionario.

Los datos han sido tratados gráficamente con una sensibilidad de cuadrícula de $0,01^\circ\text{C}$ para T_c y $0,04^\circ\text{C}$ para T_f y una sensibilidad en tiempos de 25 segundos, salvo para la pared de 8 cm donde se ha tomado una sensibilidad en tiempos de 50 segundos (recordemos que tenemos medidas cada 5 s y la sensibilidad de los termopares ronda la céntesima de grado centígrado). Para la medida y comparación de amplitudes se han trazado dos rectas paralelas que se ajustan, a los mínimos y máximos dando una amplitud pico-pico promedio como se muestra en la *Figura 41*, gráficos que se han numerado y ordenado atendiendo a la capacidad que muestra cada uno de los especímenes para atenuar la onda térmica externa. Por otro lado, para la medida del desfase en tiempos se han trazado líneas perpendiculares al eje de tiempos para tres máximos y tres mínimos de cada curva, obteniéndose un valor promedio a partir de estas seis medidas.

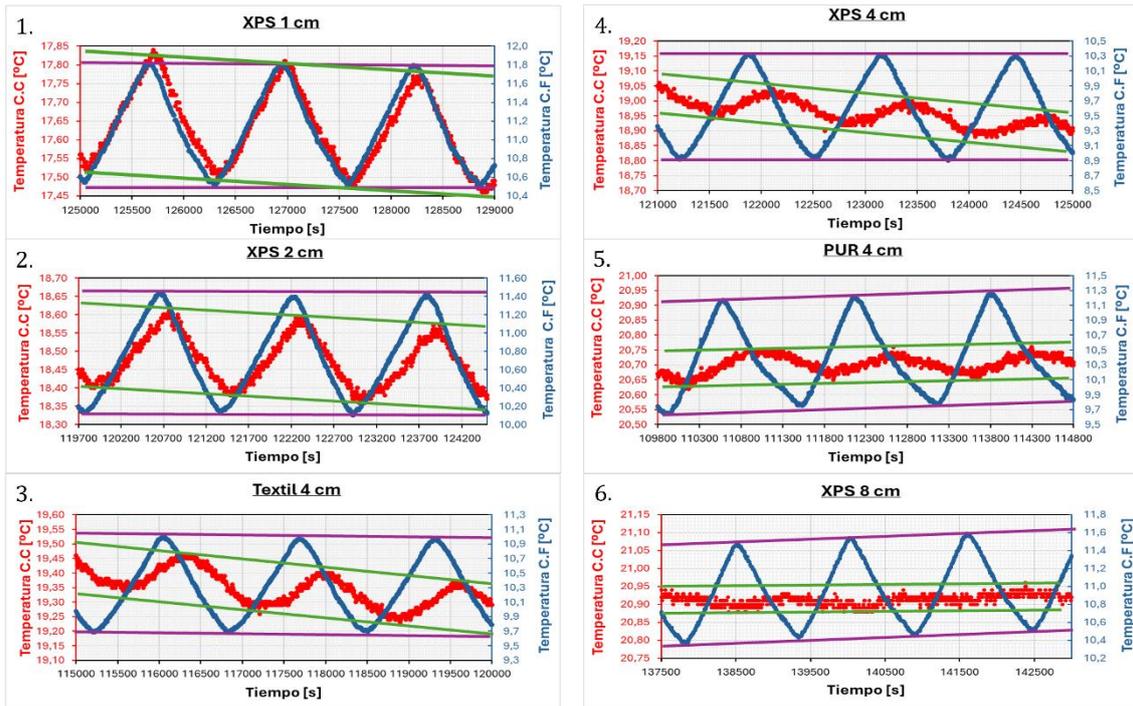


Figura 41. Estudio gráfico de amplitudes térmicas entre las cámaras caliente y fría para cada uno de los especímenes numerados en orden creciente de atenuación térmica: 1. XPS 1 cm. 2. XPS 2 cm. 3. Textil 4 cm. 4. XPS 4 cm. 5. PUR 4 cm. 6. XPS 8 cm.

Los resultados de este tratamiento gráfico se han presentado en la *Tabla 3*. Donde se ha obtenido el factor de decremento como cociente entre amplitudes térmicas externa e interna superficiales (cara caliente y cara fría respectivamente $A_{C.C}/A_{C.F}$) y el desfase o retardo térmico (“time lag” en la literatura) mediante el procedimiento gráfico descrito. Los resultados presentados se han ordenado según disminuye el factor de decremento o lo que es lo mismo según aumenta la capacidad de atenuación térmica del material, mientras que los valores estimados para el retardo tienden a aumentar a medida que se incrementa el grosor de la muestra y se reduce la conductividad térmica del material. Cabe destacar que el retardo o time lag suele medirse en horas ya que la oscilación de temperaturas externa tendrá periodos de aproximadamente 24 horas si consideramos que el máximo de temperaturas se encuentra por ejemplo durante el día y el mínimo durante la noche (semiperiodos de aproximadamente 12 horas). Mientras que, los periodos de oscilación de temperaturas de nuestra cámara fría son de aproximadamente 20-30 minutos, razón por la que se ha determinado este parámetro en segundos. Además, existen diversas definiciones que involucran diferentes temperaturas a la hora de estimar estos factores, ya sea la superficial de las muestras [69], como se ha usado en este caso, o la temperatura interior y exterior del aire [67,68].

Tabla 3. Factor de decremento (*d.fact*) y retardo (*t.lag*) para los especímenes a ensayo obtenidos mediante un análisis gráfico a pequeña escala de la oscilación térmica de la cámara fría.

Muestras	<i>d.fact</i>	<i>t.lag</i> [s]
XPS 1 cm	0,23	50 ± 16
XPS 2 cm	0,17	125 ± 16
Textil 4 cm	0,12	316 ± 40
XPS 4 cm	0,08	304 ± 18
PUR 4 cm	0,08	446 ± 95
XPS 8 cm	0,06	708 ± 80

5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO:

En este estudio se ha desarrollado y validado una metodología para ensayar y analizar propiedades térmicas de materiales aislantes mediante un prototipo modificado de hot box.

En primer lugar, se ha diseñado y construido el prototipo *HB*, para ello se han empleado 6 termopares para el control de temperaturas del aire del equipo (tres situados en la cámara caliente y tres en la fría), mientras que dos termopares adicionales situados junto a dos sensores de flujo de calor se encargan de medir las temperaturas y flujos térmicos en las superficies caliente y fría de la muestra. Los especímenes (poliestireno extruido (XPS), poliuretano rígido (PUR), y reciclado textil) han sido caracterizados en términos de su densidad, estructura y conductividad térmica. Los ensayos de conductividad térmica se han realizado en un conductímetro de flujo de calor y los resultados obtenidos se han empleado como valores referencia.

En segundo lugar, se ha fijado una metodología de medida y tratamiento de datos para una muestra de XPS de 4 cm en dos intervalos térmicos diferentes (25-10 °C y 20-10 °C). Durante el análisis del primer estacionario se han observado variaciones significativas de temperaturas y flujos térmicos, razón por la cual se han comparado tres regímenes diferentes (máximo, mínimo y 4 ciclos térmicos). Se ha observado que los tres regímenes presentan resultados de conductividades muy similares, por lo que se ha escogido el régimen que mayor optimización de tiempos permite (4 ciclos) acorde a los objetivos marcados. Por otra parte, para el segundo estacionario se han elegido intervalos de aproximadamente 3 horas de estabilidad (siete horas después del apagado del calefactor) obteniéndose la conductividad térmica resultante. Finalmente, se ha desarrollado una calibración para cada intervalo térmico debido a que las conductividades obtenidas eran inferiores a los valores referencia para este material.

En tercer lugar, se ha validado la metodología y la calibración con diferentes muestras de XPS (1, 2 y 8 cm de espesor). El equipo ha demostrado una buena precisión a la hora de caracterizar la conductividad térmica para especímenes de pequeñas dimensiones y bajos espesores de XPS. En concreto se ha observado que los resultados mejoran al aumentar la amplitud térmica entre cámaras, con errores relativos inferiores al 4 y 9 % al comparar con los respectivos intervalos térmicos medidos en la técnica *HFM*. Que se corresponden con errores absolutos aproximadamente entre 1 y 3 $mW/(m \cdot K)$. Por otra parte, el ensayo de especímenes de amplias dimensiones requiere un estudio más exhaustivo, ya que se han obtenido errores superiores al 16 %, debido a los pequeños rangos de flujo térmico, donde la resolución de los sensores es limitada.

Posteriormente se ha seguido un procedimiento equivalente para muestras de PUR y reciclado textil. Por un lado, se encuentra el PUR material para el que se han obtenido errores relativos de aproximadamente el 3 %, demostrando la efectividad de la metodología. Por otro lado, se tienen los resultados para el reciclado textil, material para el cual se han obtenido errores relativos > 15 % debido a un contacto poco efectivo entre los sensores y las superficies de la muestra. Por ello, y para caracterizar térmicamente este tipo de estructuras aislantes será necesario mejorar el contacto efectivo sensor-muestra y/o adaptar la calibración de los sensores a este tipo de aislantes térmicos.

Finalmente se ha aprovechado las características del prototipo para adoptar un enfoque diferente orientado al análisis de propiedades dinámicas que dan cuenta de la respuesta de los diferentes materiales aislantes bajo condiciones periódicas de temperatura, realizando un estudio gráfico de variables como el factor de decremento y el desfase o retardo térmico para cada uno de los especímenes, magnitudes que comienzan a adquirir relevancia en el sector construcción ya que dan cuenta de la capacidad aislante de los materiales en condiciones térmicas más realistas.

Con todo ello, se ha validado el prototipo y la metodología empleada para muestras de pequeñas dimensiones y diferentes materiales, optimizando costes, tiempos y precisión de los ensayos bajo condiciones estacionarias. Sin embargo, el equipo tiene un montón de posibilidades y trabajo por delante, donde se pueden pulir muchos factores y resultados.

Algunos puntos clave que se pueden adoptar son:

- Controlar la temperatura de la sala laboratorio para evitar oscilaciones de temperaturas y flujos promedio dentro del prototipo.
- Medir en mayores rangos de temperatura y desarrollar una calibración más precisa de sensores: se ha encontrado una mayor precisión de resultados para el periodo estacionario de mayor amplitud térmica, de esta forma aumentar el rango térmico puede ser una solución que permita optimizar errores y establecer una mejor calibración térmica para los sensores.
- Optimizar en mayor medida la duración de los ensayos: se ha visto que la duración completa de los periodos de ensayo se puede reducir a 40 horas efectivas, donde la estabilización previa del equipo y segundo estacionario suponen más del 75 % de este tiempo, siendo regímenes muy similares, por ello reducir el periodo de estabilización a 12-14 h, y prescindir de la segunda región estacionaria (medida como la estabilización inicial) permitiría obtener resultados en tiempos inferiores a las 24 horas.
- Mejorar las máscaras térmicas de las muestras: hemos visto en las imágenes por termografía infrarroja fugas térmicas correspondientes a las juntas que abrazan la muestra, por ello ingeniar un mejor sistema de soporte y máscara para las muestras es un punto de gran interés y con gran potencial de mejora.
- Mejorar el contacto muestra-sensor para materiales basados en fibras: se podrían utilizar placas externas que apliquen presión a los laterales de la muestra para asegurar un contacto efectivo entre sensores y material.
- Mejoras en el equipo de climatización y calefacción: uno de los principales problemas con los que cuenta este equipo es el control preciso de la temperatura dentro de cámaras, esto es debido a que tanto el frigo como el calefactor presentan oscilaciones significativas de varios grados, punto donde se pueden adoptar diferentes enfoques:
 - Cambiar el calefactor por un sistema de calentamiento más preciso, dentro de las posibilidades tenemos algunos candidatos como el uso de una manta térmica o emplear una bombilla cerámica que podríamos conectar a un generador de tensión, hecho que permitiría monitorear la energía que entregamos a la cámara caliente, y calcular los flujos térmicos de forma directa (sin sensores de flujo) una vez corregidas las pérdidas del sistema.
 - En ambas cámaras podría montarse un sistema convectivo formado por varios ventiladores para homogeneizar las temperaturas, aislados de tal manera que la muestra a ensayo no sea influenciada por las corrientes de aire. Solución que podría suponer una mejora notable en las temperaturas de la cámara frigorífica.
- Mejorar el aislamiento: el aislamiento de las cámaras consta de paredes con grosores de 8 cm más aproximadamente 2 cm de aislamiento reflectante, aumentar el grosor de las paredes puede ser, por tanto, una solución factible a la hora de minimizar pérdidas térmicas del sistema y sus errores asociados.
- Realizar un estudio más riguroso de ensayos y caracterización dinámica de propiedades: donde se podrían incluir factores externos como humedad o velocidad del viento entre otros en el caso de montar un sistema convectivo.

Bibliografía:

- [1] T. Ahmad, D. Zhang, A critical review of comparative global historical energy consumption and future demand: The story told so far, *Energy Reports* 6 (2020) 1973–1991. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.07.020>.
- [2] L. Pérez-Lombard, J. Ortiz, C. Pout, A review on buildings energy consumption information, *Energy Build.* 40 (2008) 394–398. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.03.007>.
- [3] 2023 Global Status Report for Buildings and Construction: Beyond foundations - Mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector, 2024. <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/45095>.
- [4] International Energy Agency. Transition to sustainable buildings: Strategies and opportunities to 2050, 2013. <https://doi.org/10.1787/9789264202955-en>.
- [5] D. Ürge-Vorsatz, L.F. Cabeza, S. Serrano, C. Barreneche, K. Petrichenko, Heating and cooling energy trends and drivers in buildings, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 41 (2015) 85–98. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.039>.
- [6] B. Rodríguez-Soria, J. Domínguez-Hernández, J.M. Pérez-Bella, J.J. Del Coz-Díaz, Review of international regulations governing the thermal insulation requirements of residential buildings and the harmonization of envelope energy loss, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 34 (2014) 78–90. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.009>.
- [7] C. Moore, S. Shrestha, S. Gokarakonda, Building energy standards and labelling in Europe, *Wuppertal Inst.* (2019) 1–112.
- [8] M. Garzón-Juan, A.M. Nieto-Morote, F. de A. Ruz-Vila, Comparison of Standards of Certification for Buildings Almost Zero Consumption. Thermal Insulation Requirements, *Proc. from Int. Congr. Proj. Manag. Eng.* (2020) 1500–1512.
- [9] N. Soares, C. Martins, M. Gonçalves, P. Santos, L.S. da Silva, J.J. Costa, Laboratory and in-situ non-destructive methods to evaluate the thermal transmittance and behavior of walls, windows, and construction elements with innovative materials: A review, *Energy Build.* 182 (2019) 88–110. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.10.021>.
- [10] B. Abu-Jdayil, A.H. Mourad, W. Hittini, M. Hassan, S. Hameedi, Traditional, state-of-the-art and renewable thermal building insulation materials: An overview, *Constr. Build. Mater.* 214 (2019) 709–735. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.102>.
- [11] A. Wicaksana, T. Rachman, Modelos Estructurales y Propiedades Mecánicas de Aerogeles Híbridos, *Angew. Chemie Int. Ed.* 6(11), 951–952. 3 (2018) 10–27. <https://medium.com/@arifwicaksanaa/pengertian-use-case-a7e576e1b6bf>.
- [12] V. Bernardo, J. Martin-de Leon, J. Pinto, R. Verdejo, M.A. Rodriguez-Perez, Modeling the heat transfer by conduction of nanocellular polymers with bimodal cellular structures, *Polymer (Guildf)*. 160 (2019) 126–137. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2018.11.047>.
- [13] M. Alvarez-Lainez, M.A Rodríguez-Pérez, J.A. de Saja, Thermal Conductivity of Open-Cell Polyolefin Foams, *J. Polym. Sci.* (2008) 212–221. <https://doi.org/10.1002/polb.21358>.
- [14] B. Klose, Morphology control of polystyrene foams with supramolecular additives, (2021).
- [15] I. Sánchez-Calderón, V. Bernardo, D. Cuadra-Rodríguez, J. Martín-de-León, M.Á.

- Rodríguez-Pérez, Micronization as a solution for enhancing the thermal insulation of nanocellular poly(methyl-methacrylate) (PMMA), *Polymer (Guildf)*. 261 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2022.125397>.
- [16] H.-P. Ebert, Ebert, Hans-Peter. (2011). *Thermal Properties of Aerogels.*, (n.d.). https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7589-8_23.
- [17] L.R. Glicksman, “Heat Transfer in foams” *Low density cellular plastics*, Chapter 5, 1994. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-1256-7>.
- [18] C. V. Vo, F. Bunge, J. Duffy, L. Hood, *Advances in thermal insulation of extruded polystyrene foams*, *Cell. Polym.* 30 (2011) 137–156. <https://doi.org/10.1177/026248931103000303>.
- [19] B. Notario, J. Pinto, E. Solorzano, J.A. De Saja, M. Dumon, M.A. Rodríguez-Pérez, Experimental validation of the Knudsen effect in nanocellular polymeric foams, *Polymer (Guildf)*. 56 (2015) 57–67. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2014.10.006>.
- [20] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Kinetic/menfre.html>, (n.d.).
- [21] Z.Y. Li, C.Y. Zhu, X.P. Zhao, A theoretical and numerical study on the gas-contributed thermal conductivity in aerogel, *Int. J. Heat Mass Transf.* 108 (2017) 1982–1990. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.01.051>.
- [22] J. Martín-de León, Understanding the production process of nanocellular polymers based on pmma driven by a homogeneous nucleation., (2019) 345.
- [23] L.W. Hrubesh, R.W. Pekala, Thermal properties of organic and inorganic aerogels, *J. Mater. Res.* 9 (1994) 731–738. <https://doi.org/10.1557/jmr.1994.0731>.
- [24] I. Sánchez-Calderón, V. Bernardo, J. Martín-de-León, M.Á. Rodríguez-Pérez, Thermal conductivity of low-density micro- and nanocellular poly(methyl-methacrylate) (PMMA): Experimental and modeling, *Mater. Des.* 221 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110938>.
- [25] J.R. Howell, M.P. Mengüç, K. Daun, R. Siegel, *Radiation, Thermal Transfer, Heat*, 2021.
- [26] W. Villasmil, L.J. Fischer, J. Worlitschek, A review and evaluation of thermal insulation materials and methods for thermal energy storage systems, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 103 (2019) 71–84. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.040>.
- [27] S. Schiavoni, F. D’Alessandro, F. Bianchi, F. Asdrubali, Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 62 (2016) 988–1011. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.045>.
- [28] I. Sánchez-Calderón, *Study of the Thermal Conductivity of Bulk and Micronized Nanocellular Polymers*, University of Valladolid, 2023.
- [29] A. Patti, D. Acierno, *Thermal Conductivity of Polypropylene-Based Materials*, *Polypropyl. - Polym. Charact. Mech. Therm. Prop.* (2020). <https://doi.org/10.5772/intechopen.84477>.
- [30] N. Yüksel, *Methods and Techniques for Measuring the Thermal Conductivity of Insulation Materials*, *Intech Open Sci.* (2016) 115–123.
- [31] D. Zhao, X. Qian, X. Gu, S.A. Jajja, R. Yang, Measurement techniques for thermal conductivity and interfacial thermal conductance of bulk and thin film materials, *J. Electron. Packag. Trans. ASME* 138 (2016) 1–19. <https://doi.org/10.1115/1.4034605>.

- [32] ASTM C518 Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus, (2017)., (n.d.).
- [33] ISO 8301 Thermal insulation - Determination of steady-state thermal resistance and related properties - Heat flow meter, (1991)., (n.d.).
- [34] ASTM C177 Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus, (1997)., (n.d.).
- [35] ISO 8302 Thermal insulation - Determination of steady-state thermal resistance and related properties - Guarded hot plate apparatus, (1991).
https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/11594d7b-fd5c-45d7-816b_8e35f1df4d95/iso-4832-199, (n.d.).
- [36] Y. Jannot, A. Degiovanni, V. Grigoroza-Moutiers, J. Godefroy, A passive guard for low thermal conductivity measurement of small samples by the hot plate method, *Meas. Sci. Technol.* 28 (2017). <https://doi.org/10.1088/1361-6501/28/1/015008>.
- [37] Y. Jannot, S. Schaefer, A. Degiovanni, J. Bianchin, V. Fierro, A. Celzard, A new method for measuring the thermal conductivity of small insulating samples, *Rev. Sci. Instrum.* 90 (2019). <https://doi.org/10.1063/1.5065562>.
- [38] I. Sánchez-Calderón, B. Merillas, V. Bernardo, M.Á. Rodríguez-Pérez, Methodology for measuring the thermal conductivity of insulating samples with small dimensions by heat flow meter technique, *J. Therm. Anal. Calorim.* 147 (2022) 12523–12533.
<https://doi.org/10.1007/s10973-022-11457-7>.
- [39] R.C. Kerschbaumer, S. Stieger, M. Gschwandl, T. Hutterer, M. Fasching, B. Lechner, L. Meinhart, J. Hildenbrandt, B. Schritteser, P.F. Fuchs, G.R. Berger, W. Friesenbichler, Comparison of steady-state and transient thermal conductivity testing methods using different industrial rubber compounds, *Polym. Test.* 80 (2019) 106121.
<https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.106121>.
- [40] ISO 22007-2, Plastics – Determination of Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity – Part 2: Transient Plane Source Method, (n.d.).
- [41] ISO 22007-4, Plastics – Determination of Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity – Part 4: Laser Flash Method., (n.d.).
- [42] I. Sánchez-Calderón, Á. Sillero, F. Lizalde-Arroyo, V. Bernardo, J. Martín-de-León, M.Á. Rodríguez-Pérez, Evaluation of methods to accurately characterize the thermal conductivity of micro-and nanocellular polymers based on poly(methyl-methacrylate) (PMMA) produced at lab-scale, *Polym. Test.* 117 (2023).
<https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107842>.
- [43] B. Tejedor, M. Casals, M. Gangoells, X. Roca, Quantitative internal infrared thermography for determining in-situ thermal behaviour of façades, *Energy Build.* 151 (2017) 187–197. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.040>.
- [44] R. Albatici, A.M. Tonelli, Infrared thermovision technique for the assessment of thermal transmittance value of opaque building elements on site, *Energy Build.* 42 (2010) 2177–2183. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.07.010>.
- [45] J.F. Lara Soto, A. Fernández Gutiérrez, Aplicación de la termografía infrarroja a la observación y medición de flujos de aire, *Técnica Ind.* 317 (2018) 34–40.
<https://doi.org/10.23800/8858>.

- [46] ISO/FDIS 9869-2, Thermal insulation - Building elements - In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance - Part 2: Infrared method for frame structure dwelling. International Standard Organization., (n.d.).
- [47] ASTM E1316-17a, Standard terminology for non-destructive examinations. American Society for Testing and Materials, 2017., (n.d.).
- [48] ISO 6781-1:2023, Thermal insulation - Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes - Infrared method. International Organization for Standardization, 1983., (n.d.).
- [49] ISO 10880:2017, Non-destructive testing - Infrared thermographic testing - General principles. International Organization for Standardization, 2017., (n.d.).
- [50] S.T. Method, ASTM C1363-11 Standard Test Method for Assemblies by Means of a Hot Box Apparatus, (2011). <https://doi.org/10.1520/C1363-11.2>.
- [51] ISO 8990:1994, Thermal insulation - Determination of steady-state thermal transmission properties - Calibrated and guarded hot box. International Standard Organization, 1994., (n.d.).
- [52] W.C. Brown, D.G. Stephenson, Guarded hot box procedure for determining the dynamic response of full-scale wall specimens - Part I, *ASHRAE Trans.* 99 (1993) 632–642.
- [53] W.C. Brown, D.G. Stephenson, Guarded hot box measurements of the dynamic heat transmission characteristics of seven wall specimens - Part II, *ASHRAE Trans.* 99 (1993) 643–660.
- [54] M. Ahmad, H. Sallée, D. Quenard, A. Bontemps, Thermal testing and numerical simulation of a prototype cell using light wallboards coupling Vacuum Isolation Panels (VIP) and Phase Change Material (PCM), *Proc. 3rd Int. Build. Phys. Conf. - Res. Build. Phys. Build. Eng.* (2006) 243–250.
- [55] C. Boulebbina, G. Mebarki, S. Rahal, Passive solar house prototype design with a new bio-based material for a semi-arid climate, *Mater. Renew. Sustain. Energy* 11 (2022) 1–15. <https://doi.org/10.1007/s40243-021-00203-y>.
- [56] C. Tribuiani, L. Tarabelli, S. Summa, C. Di Perna, Thermal performance of a massive wall in the Mediterranean climate: Experimental and analytical research, *Appl. Sci.* 10 (2020). <https://doi.org/10.3390/app10134611>.
- [57] M.H.A.L. Youcef, V. Feuillet, L. Ibos, Y. Candau, P. Balcon, A. Filloux, Quantitative diagnosis of insulated building walls of restored old constructions using active infrared thermography, *Quant. Infrared Thermogr. J.* 8 (2011) 65–87. <https://doi.org/10.3166/qirt.8.65-87>.
- [58] T.T. Ha, V. Feuillet, J. Waeytens, K. Zibouche, L. Peiffer, Y. Garcia, V. Le Sant, R. Bouchie, A. Koenen, J.P. Monchau, L. Ibos, Measurement prototype for fast estimation of building wall thermal resistance under controlled and natural environmental conditions, *Energy Build.* 268 (2022) 112166. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112166>.
- [59] T.-T. Ha, L. Ibos, V. Feuillet, Y. Garcia, V. Le Sant, A. Koenen, L. Peiffer, R. Bouchie, K. Zibouche, J. Waeytens, Experimental works with new prototype for measuring thermal resistance of building walls, (n.d.). <https://doi.org/10.25855/SFT2020-096>.
- [60] M. O’Grady, A.A. Lechowska, A.M. Harte, Quantification of heat losses through building

- envelope thermal bridges influenced by wind velocity using the outdoor infrared thermography technique, *Appl. Energy* 208 (2017) 1038–1052.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.09.047>.
- [61] K. Trgala, M. Pavelek, R. Wimmer, Energy performance of five different building envelope structures using a modified Guarded Hot Box apparatus—Comparative analysis, *Energy Build.* 195 (2019) 116–125.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.04.036>.
- [62] Á. Lakatos, Z. Kovács, Comparison of thermal insulation performance of vacuum insulation panels with EPS protection layers measured with different methods, *Energy Build.* 236 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110771>.
- [63] Z. Shen, A.L. Brooks, Y. He, S.S. Shrestha, H. Zhou, Evaluating dynamic thermal performance of building envelope components using small-scale calibrated hot box tests, *Energy Build.* 251 (2021) 111342. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111342>.
- [64] A. Alhawari, A. Alhawari, P. Mukhopadhyaya, Construction and Calibration of a Unique Hot Box Apparatus, *Energies* 15 (2022). <https://doi.org/10.3390/en15134677>.
- [65] S. Alqahtani, H.M. Ali, H. Ali, F. Farukh, K. Kandan, Development of affordable hot box calorimeter to determine the U-value of inhomogeneous building material, *J. Mater. Res. Technol.* 25 (2023) 6492–6502. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.07.032>.
- [66] UNE-EN 1602, Thermal insulating products for building applications - Determination of the apparent density, (n.d.).
- [67] H. Asan, Numerical computation of time lags and decrement factors for different building materials, *Build. Environ.* 41 (2006) 615–620.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.02.020>.
- [68] <https://www.greenspec.co.uk/building-design/decrement-delay/>, (n.d.).
- [69] F. Mokhtari, L. Loukarfi, M. Chikhi, K. Imessad, N. Ait Messaoudene, A passive wall design to minimize building temperature swings for Algerian Saharan climate, *Sci. Technol. Built Environ.* 23 (2017) 1142–1150.
<https://doi.org/10.1080/23744731.2016.1273020>.