EVALUACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE PLACAS DE RESIDUOS TEXTILES Y ALMIDÓN DE PAPA CON UNA EXPERIMENTAL CAJA CALIENTE

Kristina Atanasoska[1]
[1]Instituto de Investigaciones en Desarrollo Urbano, Tecnología y Vivienda (IIDUTyV) - Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño (FAUD) - Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMDP) – Deán Funes 3350 C.P. 7600 – Mar del Plata
Tel. 0223-5942396 e-mail: kristinaatanasoska@mdp.edu.ar

RESUMEN: La conductividad térmica es una propiedad clave en el desarrollo de materiales de construcción para una arquitectura energéticamente eficiente. En este estudio se presenta el diseño y metodología de calibración de una caja caliente de bajo costo, empleada para medir la conductividad térmica de placas elaboradas con residuos textiles y almidón de papa. La calibración del dispositivo se realizó mediante tres ecuaciones de regresión lineal, basadas en materiales de referencia con densidades aparentes entre 250 y 800 kg/m³. Los resultados obtenidos mostraron errores cercanos al 10 % en comparación con los valores declarados de dichos materiales, lo que valida la precisión del instrumento en contextos de investigación. Aunque se requieren más pruebas para densidades fuera del rango de calibración, la caja caliente demostró ser una herramienta práctica y confiable para el análisis térmico de materiales experimentales. Las placas experimentales evaluadas presentaron conductividades térmicas entre 0,065 y 0,24 W/m·K, en función de su densidad. De las cinco placas ensayadas, tres mostraron valores dentro de un rango potencialmente adecuado para su uso como material aislante.

Palabras clave: metodología de calibración, densidad aparente, materiales de construcción, aislantes alternativos.

INTRODUCCIÓN

A nivel global se está incumpliendo el derecho fundamental a una vivienda adecuada. Según el informe de las Naciones Unidas-Hábitat (2023), 24,2 % de la población urbana vive en barrios marginales o en viviendas con condiciones inadecuadas. Según los datos del Registro Nacional de Barrios Populares en Proceso de Integración Urbana (ReNaBaP), en Argentina se registraron 5.687 barrios populares con aproximadamente 1.124.797 familias, de los cuales 14.066 viven en Mar del Plata (Secretaría de Desarrollo Territorial, Hábitat y Vivienda, 2023). En este contexto, la mayoría de las viviendas son autoconstruidas realizadas sin asistencia profesional y con una inversión mínima, lo cual aumenta la vulnerabilidad de la población y eleva el riesgo de padecer enfermedades. La Organización Panamericana de la Salud (2022) consideró que las condiciones habitacionales relacionadas con la salud son de suma importancia debido al tiempo que las personas pasan en sus hogares. Algunos de los principales riesgos señalados en ese informe, son el frío y la humedad. El frío lo asociaron con la alta morbilidad y mortalidad respiratoria y cardiovascular, mientras que la humedad, con las alergias y las enfermedades del tracto respiratorio, asma, neumonitis, alveolitis alérgica y disnea.

El problema que más afecta el comportamiento térmico de una envolvente es la falta o el uso insuficiente de aislamiento térmico. Los aislantes térmicos más utilizados en el mundo son las lanas minerales y las espumas plásticas (Basim Abu-Jdayil et al., 2019; Pavel y Blagoeva, 2018). Estos productos tienen una resistencia térmica muy alta, lo que los convierte en buenos aislantes térmicos; sin embargo, tienen un impacto ambiental, ya que requieren materias primas para su producción y contaminan al no ser biodegradables (Asdrubali et al., 2015). Gran parte de las investigaciones realizadas en el instituto donde se lleva a cabo esta actividad se enfocan en la producción del hábitat popular, y el desarrollo de nuevos

componentes en función de la disponibilidad de materiales y las oportunidades en el territorio. Para analizar la eficiencia térmica de los materiales alternativos y su viabilidad en aplicaciones habitacionales, una de las características más importantes es la conductividad térmica λ (W/m·K).

Existen diversos métodos e instrumentos disponibles para obtener la conductividad térmica. Para materiales homogéneos y muestras multicapa pequeñas, dos de los métodos más utilizados son el del medidor de flujo de calor (Instituto Argentino de Normalización y Certificación, 2002a) y el de la placa caliente (Instituto Argentino de Normalización y Certificación, 1995). En Argentina, el Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) realiza ambos ensayos; sin embargo, su costo es elevado para fines de investigación. Un método para determinar la conductividad térmica de suelo y piedras que se puede realizar in situ es el de la sonda térmica, el cual se puede utilizar tanto para materiales homogéneos como para heterogéneos (American Society for Testing and Materials (ASTM), 2022). A su vez, para componentes constructivos y materiales homogéneos o no homogéneos de gran tamaño, los métodos más recomendados son la caja caliente con guarda y la caja caliente calibrada (Instituto Argentino de Normalización y Certificación, 1997). Estos métodos permiten medir el coeficiente de transmitancia térmica U ($W/m^2 \cdot K$), teniendo en cuenta no solo el espesor de la muestra, sino también los efectos de la transferencia de calor por convección entre la superficie de la muestra y el aire dentro de la caja.

Varios grupos de investigación han desarrollado dispositivos de Caja Caliente Calibrada (CCC en adelante) con el objetivo de analizar el comportamiento térmico de materiales y sistemas constructivos. Asdrubali y Baldinelli (2011) diseñaron una CCC con dimensiones de cámara de 2,7 m × 2,0 m × 0,9 m y analizaron la conductividad térmica de una ventana de aluminio utilizando tres normas diferentes (ASTM C1363-05, ISO 8990 y GOST 26602.1-99). Concluyeron que la norma rusa era más precisa al ensayar materiales y componentes homogéneos, mientras que las normas americana y europea, ofrecían resultados válidos independientemente de la complejidad del material. Buratti et al. (2016) construyeron una pequeña CCC con área de apertura de 0,46 m × 0,46 m y utilizaron el laboratorio como cámara fría. Emplearon dos métodos, el método de flujo térmico y el método de la Caja Caliente, para analizar la conductividad térmica de morteros con fibra de vidrio. Shen et al. (2021) investigaron la relación entre las propiedades térmicas de envolventes de tamaño real y muestras a escala reducida utilizando una CCC con área de apertura de 35,5 m × 35,5 m. Derivaron una relación de escalado y demostraron que la prueba a escala reducida era efectiva y rentable. Tejeda-Vázquez et al. (2021) usaron una CCC con dos cámaras, cada una de 1 m × 1 m × 1 m, para analizar la conductividad térmica de muros de bloques de hormigón con y sin mortero. Simularon distintas condiciones climáticas considerando temperatura y humedad relativa, y concluyeron que el aumento de la humedad relativa disminuye la resistencia térmica del muro. Alhawari y Mukhopadhyaya (2022) diseñaron una CCC con cámaras caliente y fría, también de 1 m × 1 m × 1 m, construida con paneles de aislamiento al vacío. Lograron una CCC con una estabilidad excepcional, con fluctuaciones de temperatura en las cámaras por debajo de ±0,05°C. En Argentina, Villalba et al. (2017) diseñaron una caja caliente económica para medir el factor de aporte de calor solar en carpinterías con sombreado interior, y compararon los resultados con los obtenidos mediante el programa Window 6, descubriendo diferencias significativas.

En este trabajo se presenta la calibración de una pequeña Caja Caliente Calibrada experimental de bajo costo y el análisis de la conductividad térmica de las placas térmicas alternativas producidas con residuos textiles y almidón de papa. La calibración se realizó mediante la metodología de la Caja Caliente con la utilización de materiales con propiedades térmicas conocidas. La calibración dio como resultado tres ecuaciones diferentes, las cuales se pueden aplicar según las densidades aparentes de los materiales. Con esta metodología se ensayaron cinco placas de residuos textiles y almidón de papa con densidades que varían entre 306 y 540 kg/m^3. En tres de las placas los valores de la conductividad térmica fueron inferiores a 0,1 W/m·K.

METODOLOGÍA

Descripción del aparato

Las dimensiones externas de la pequeña Caja Caliente Calibrada de bajo costo son 0,55 m x 0,55 m x 0,95 m de alto (Figura 1). Las paredes perimetrales de la cámara caliente están hechas de EPS (del inglés Expanded Polystyrene) de alta densidad de 4 cm de espesor, con conductividad térmica (λ) de 0,032

W/m·K. La abertura de la caja, donde se colocan las muestras, es de 0,47 m × 0,56 m. Todas las uniones están selladas con cemento de contacto y silicona. La temperatura en la cámara caliente se genera mediante lámparas incandescentes que proporcionan potencia de 40, 42, 53, 60 y 100 W. El laboratorio utilizado como cámara fría tiene dimensiones de 3,5 m × 10 m × 3 m de alto y no cuenta con sistema de refrigeración ni calefacción.

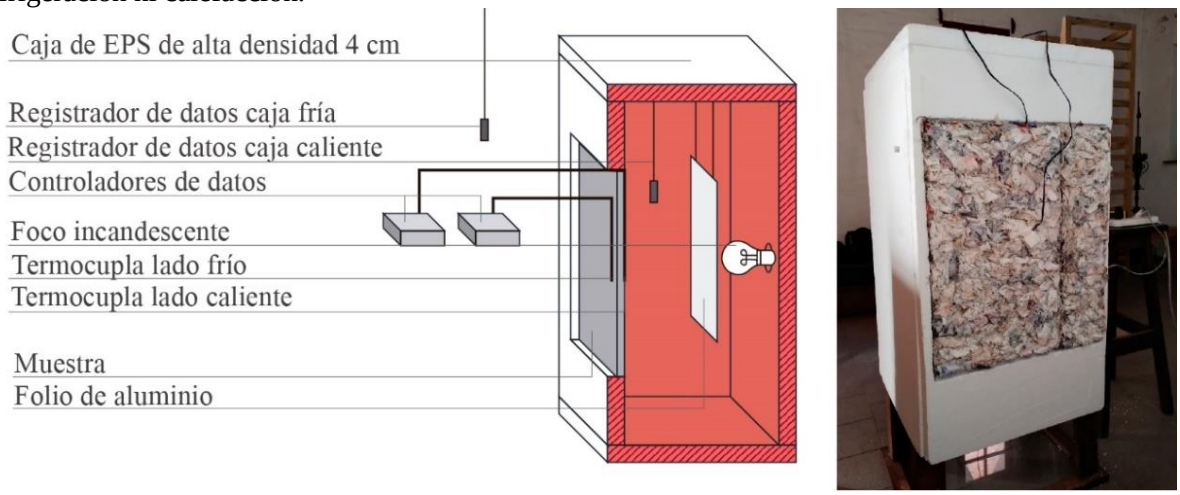


Figura 1: Corte perspectivado y vista general de la caja caliente calibrada.

Se utilizaron dos registradores de datos ELITECH RC-5+ para medir la temperatura del aire en las dos cámaras. Según el fabricante, el rango de funcionamiento es de -30°C a 70°C, con una precisión de ±0,5°C. Se utilizaron termocuplas conectados a controladores de temperatura ELITECH ETC-200+ para medir las temperaturas superficiales. El rango de control de temperatura de los controladores es de -50°C a 120°C, con una precisión de ±0,5°C para temperaturas entre -10°C y 85°C.

Calibración del aparato

La campaña experimental se llevó a cabo entre mayo y diciembre de 2024. Las pruebas tuvieron una duración mínima de 4 y máxima de 24 horas. En todas ellas se alcanzaron condiciones de estado estacionario durante al menos tres horas. Los datos de temperatura del aire y de las superficies se registraron cada 15 minutos. La variación de la temperatura del aire en la cámara caliente fue de hasta 0,5°C, y en la cámara fría, de hasta 0,7°C. En cuanto a las temperaturas superficiales, la variación fue de hasta 0,3°C en ambos lados, caliente y frío. Durante el estado estacionario, la diferencia de temperatura entre el aire de las cámaras caliente y fría fue siempre superior a 20°C. Las temperaturas del aire se utilizan para verificar que el sistema ha alcanzado el estado estacionario, mientras que las temperaturas superficiales se emplean en el procedimiento de calibración. Cabe destacar que, aunque la campaña experimental se extendió durante ocho meses, cada material fue ensayado en la misma época del año, cuando la temperatura exterior no presentó grandes variaciones. Por este motivo, no fue posible observar si los cambios de temperatura ambiental influyeron en las mediciones.

El procedimiento de calibración determina la precisión de la CCC. En esta investigación, para calibrar la nueva CCC se aplicó el método experimental o método de la Caja Caliente Calibrada (Alhawari & Mukhopadhyaya, 2022; Buratti et al., 2016). Esto se realizó utilizando diferentes materiales con conductividades térmicas conocidas, incluyendo placas de yeso, tableros OSB (del inglés Oriented Strand Board), placa de fenólico, MDF (del inglés Medium Density Fiberboard), madera de Paulownia conocida como Kiri, y cartón corrugado. Las conductividades térmicas medidas con la CCC experimental se compararon con los valores declarados por la norma argentina IRAM 11601 (2002) o proporcionados por el fabricante.

El primer paso consistió en determinar el flujo de calor a través de las muestras con datos conocidos. Este fue calculado teóricamente utilizando la Ecuación 1.

$$q = \frac{Tmc - Tmf}{R} \quad (1)$$

donde:

q = flujo de calor (W/m^2)
Tmc = temperatura superficial de la muestra del lado caliente (°C)
Tmf = temperatura superficial de la muestra del lado frío (°C)
R = la resistencia térmica del material ($m^2 \cdot K/W$)

La resistencia térmica fue calculada con la Ecuación 2.

$$R = \frac{t}{\lambda} \quad (2)$$

donde:

t = espesor de la muestra (m)
λ = conductividad térmica del material ($W/m \cdot K$)

El segundo paso consistió en determinar la tasa de flujo de calor perdido por los muros y puentes térmicos de la caja caliente (Ecuación 3). Para eso, se tuvo en cuenta que como fuentes de calor se utilizaron diferentes focos incandescentes de 40 W, 42 W, 53 W, 60 W y 100 W.

$$Qp = Qi - Qm \quad (3)$$

donde:

Qp = tasa de flujo de calor perdido por los muros y puentes térmicos de la cámara caliente (W)
Qi = tasa de flujo de calor de ingreso en la cámara caliente (W)
Qm = tasa de flujo de calor que atraviesa la muestra (W)

El flujo de calor que atraviesa la muestra se calculó con la ecuación 4.

$$Qm = q * A \quad (4)$$

donde:

A = superficie de la muestra (m^2)

La tercera etapa de la calibración consistió en generar ecuaciones de regresión lineal basadas en la tasa de flujo de calor perdido (Qp) y la diferencia de temperatura de aire entre las cámaras caliente y fría. Estas ecuaciones se utilizaron posteriormente para estimar la pérdida de calor de las distintas muestras y así obtener la tasa de flujo de calor que atraviesa la muestra (Qm) (Ecuación 3). Con la tasa de flujo de calor que atraviesa la muestra (Qm), la diferencia de temperatura entre las superficies de las muestras del lado caliente y frío (Tmc y Tmf), la superficie de la muestra (A) y el espesor de la misma (t), se aplicó la ley de Fourier para calcular la conductividad térmica de las muestras (Ecuación 5) y comparar los resultados con los valores declarados.

$$\lambda = \frac{Qm*A}{t*(Tmc-Tmf)} \quad (5)$$

Por recomendación de la bibliografía consultada (American Society for Testing and Materials, 2019; Asdrubali & Baldinelli, 2011; Buratti, Belloni, Lunghi, & Barbanera, 2016) donde se recomienda calibrar con paneles compuestos, la primera calibración se generó con un panel compuesto por una capa de vidrio de 4 mm y otra de EPS de 15 mm. En la segunda serie de calibración, se utilizaron muestras con conductividades térmicas conocidas, y se construyeron tres ecuaciones de regresión lineal diferentes para calcular la conductividad térmica de los materiales en función de su densidad aparente ρ (kg/m^3).

Materiales y producción de las placas experimentales

Las placas ensayadas en esta investigación se conforman con residuos textiles de algodón de preconsumo (Figura 2). Este residuo es proveniente de la fabricación de la empresa Mirval, la cual tiene su taller de corte en Mar del Plata. Por lo general se trata de recortes de tamaños variados: rectangulares de 20 cm por 20 cm y tiras de 5 cm por 1 m aproximadamente. Para la preparación de las muestras para

los ensayos se cortó la tela en piezas de 5 cm × 5 cm, y para eso se utilizó una máquina de corte manual Choice con cuchilla de 70 mm y tijera de costura.



Figura 2: Placas aislantes de residuos textiles y almidón de papa.

El almidón que se usó para las placas es proveniente de las papas LAY'S®, las cuales se producen en la fábrica de PepsiCo ubicada en el parque industrial de la ciudad. A través de una entrevista personal con un empleado jerárquico de PepsiCo se descubrió que en el rebanado de las papas se generan entre 80 t y 100 t por mes de un almidón con 50 % de humedad, los cuales no tienen uso (M. Muñoz, comunicación personal, 16 de septiembre de 2022). Para mejorar las propiedades del almidón como ligante se usó la urea. Este plastificante mejora las propiedades mecánicas y la resistencia a la absorción de agua. Otro aditivo utilizado es el bórax (Na2B4O7·10H2O), para mejorar las propiedades frente al fuego (Donmez Cavdar et al., 2015) y por sus características antifúngicas (Kaya et al., 2023).

El método de fabricación de las placas consistió en la preparación de una mezcla con agua precalentada a 75°C, lo cual permitió disolver los ingredientes, pero no plastificar el almidón. Esta mezcla se colocó en una fuente y se horneó durante una hora a 200°C, temperatura en la que el almidón finalmente se plastificó. El moldeado y prensado se realizó manualmente mediante el método hand lay-up. El secado de las placas consistió en desmoldarlas sobre rejillas de 60 cm × 70 cm y completar el secado al aire en estantes diseñados especialmente para tal fin. Este proceso duró entre una y dos semanas, dependiendo de las condiciones climáticas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Calibración preliminar de la caja caliente

La primera calibración se realizó considerando la muestra ensamblada con un espesor total de 19 mm, compuesta por 4 mm de vidrio simple con una conductividad térmica de 0,58 (W/m·K) y 15 mm de EPS con una conductividad térmica de 0,037 (W/m·K). La resistencia térmica total de la muestra es de 0,41 (m^2·K/W). La calibración se llevó a cabo utilizando cuatro bombillas incandescentes con distintas potencias (42, 53, 60 y 100 W), que generaron diferencias en las temperaturas del aire y de la muestra. Los resultados pueden observarse en la Tabla 1.

Tabla 1: Resultados de la calibración del panel compuesto

Tasa de flujo de calor ingresado Qi (W)	Temperatura del aire de la caja caliente Tac (°C)	Diferencia de la temperatura de aire ΔTa (°C)	Temperatura superficial de la muestra del lado caliente Tmc(°C)	Diferencia de la temperatura superficial de las muestras ΔTm (°C)	Tasa de flujo de calor a través de la muestra Qm (W)	Tasa de flujo de calor perdido Qp (W)
100	68,57	52,73	56,60	30,77	19,99	80,01
60	48,10	32,90	41,10	19,47	12,65	47,35
53	49,40	29,53	43,33	18,80	12,22	40,78
42	41,07	23,83	34,20	13,40	8,71	33,29

Con la tasa de flujo de calor perdido Qp (W) y la diferencia de temperatura entre el aire en las cámaras caliente y fría ΔTa (°C) producida durante las mediciones, se derivó una ecuación de regresión lineal (Ecuación 6). El coeficiente de regresión es 0,9986. La ecuación de regresión lineal de la calibración preliminar se puede observar en la Figura 3.

$$Qp = 1{,}6378 * \Delta Ta - 6{,}5537 \quad (6)$$

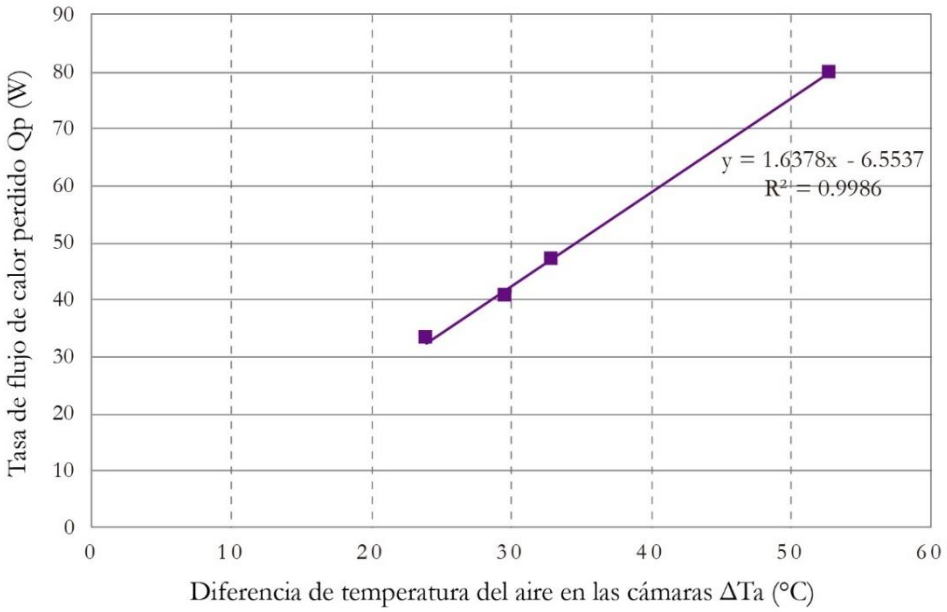


Figura 3: Ecuación de la regresión lineal de la calibración preliminar.

La ecuación de calibración lineal preliminar se aplicó a los materiales con conductividad térmica conocida con el fin de determinar la tasa de flujo de calor que atraviesa las muestras utilizando la Ecuación 3, y la conductividad térmica mediante la Ecuación 5. Entre los materiales ensayados se agregó una placa experimental de textil y cemento (Placa Texacem), debido a su densidad aparente y su conductividad térmica, la cual fue determinada por el INTI mediante el método del medidor de flujo de calor (Yajnes et al., 2023). Los resultados se compararon con los valores declarados de conductividad térmica de los materiales, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2: Comparación entre la conductividad térmica calculada con la ecuación de regresión lineal preliminar y la declarada de los materiales, junto con el porcentaje de error relativo

Material	Espesor (t, m)	Tasa de flujo de calor ingresado (Qi, W)	Temp. del aire de la caja caliente (Tac, °C)	Dif. de las temp. de aire (ΔTa, °C)	Temp. superf. de la muestra del lado caliente (Tmc, °C)	Dif. de las temp. sup. (ΔTm, °C)	Conduct. térmica declarada (λ, W/mK)	Conduct. térmica medida (λm, W/mK)	Error relativo con signo (%)
OSB	0,009	100	65,33	40,37	50,03	14,43	0,13 (Fabricante)	0,094	27,59
		60	48,07	28,37	36,17	9,67		0,070	46,28
		53	42,97	25,93	33,17	9,60		0,060	54,02
MDF	0,012	100	57,20	46,10	38,80	16,67	0,13 (IRAM 11601)	0,085	34,63
		60	49,40	28,47	36,43	9,80		0,091	29,92
		53	41,77	26,47	30,77	10,23		0,071	45,43
Fenólico		100	63,53	45,37	45,67	16,07	0,12 (Fabricante)	0,089	25,07
Placa de yeso	0,0095	100	63,13	21,87	47,27	8,66	0,37 (IRAM 11601)	0,295	20,26
		60	36,70	27,10	25,13	8,93		0,090	75,77
		53	35,23	25,77	23,57	8,20		0,076	79,34
		42	30,33	21,33	20,33	6,63		0,074	79,96
Placa Texacem	0,03	60	48,40	31,53	39,37	18,40	0,106 (Yajnes et al., 2023)	0,092	12,87
		53	49,17	27,13	41,23	16,00		0,108	-1,58
Madera Kiri	0,0175	100	53,07	42,57	37,57	16,83	0,09 (Fabricante)	0,143	-58,84
		60	41,03	29,27	30,50	12,43		0,098	-8,70
		53	40,27	27,03	30,40	11,57		0,086	4,13
		42	33,47	21,1	24,07	6,63		0,138	-53,14
Cartón corrugado	0,005	100	61,13	33,83	50,13	12,50	0,065 (Fabricante)	0,076	-19,25
		60	50,90	22,13	42,07	7,23		0,078	-16,45
		53	42,23	20,83	34,40	8,2		0,057	11,72

Se puede observar que el error en la mayoría de las mediciones es alto, y que la ecuación de calibración derivada de la muestra ensamblada no se puede aplicar indiscriminadamente para determinar la conductividad térmica de cualquier material. La única conductividad térmica medida que se encontró dentro de un margen de error del 10 % fue la de la placa Texacem con el foco incandescente de 53 W y de la madera de Kiri con los focos de 60 W y 53 W. Este hallazgo condujo a una segunda serie de calibración, la cual se presenta a continuación.

Segunda calibración de la caja caliente

En la segunda serie de calibración se desarrollaron tres ecuaciones de regresión lineal, los cuales permitieron el cálculo de la conductividad térmica de los materiales en función de su densidad aparente (ρ). Los materiales con conductividad térmica conocida se agruparon en tres grupos según su densidad: el primer grupo consistió en muestras con densidades aparentes entre 700 kg/m³ y 800 kg/m³; el segundo grupo incluyó materiales con densidades cercanas a los 500 kg/m³; y el tercer grupo contenía muestras con densidades entre 250 kg/m³ y 450 kg/m³ (Tabla 3). Se observa que la densidad y la conductividad están relacionadas excepto en el panel compuesto, donde influye la estructura en capas del material y el efecto de promediado térmico en sistemas compuestos: la densidad promedio está más influenciada por la masa del vidrio, mientras que la conductividad térmica está más influida por el espesor y la baja conductividad del EPS.

Tabla 3: Grupos de materiales con sus densidades aparentes y conductividades térmicas declaradas

Grupos	Materiales	Densidad aparente ρ (kg/m³)	Conductividad térmica declarada λ (W/mK)
Grupo 1	Placa de yeso	800	0,37
	MDF	800	0,13
	Placa de fenólico	700	0,12
	OSB	750	0,13
Grupo 2	Panel compuesto	529	0,046
	Placa Texacem	530	0,106
Grupo 3	Madera Kiri	450	0,09
	Cartón corrugado	250	0,065

Se desarrollaron dos nuevas ecuaciones de calibración utilizando el mismo método empleado en la calibración preliminar, considerando la pérdida de calor a través de las paredes y los puentes térmicos Qp (W), así como la correspondiente diferencia de temperatura entre el aire en las cámaras caliente y fría ΔTa (°C). Las tres ecuaciones de calibración, sus líneas de regresión y los coeficientes de las líneas de regresión se presentan en la Figura 4. La línea de calibración 1 se desarrolló a partir de mediciones realizadas con la placa de yeso y los cuatro focos incandescentes. La segunda ecuación de calibración se basó en el panel compuesto, y es representativa del segundo grupo de materiales, con densidades aparentes entre 450 kg/m³ y 530 kg/m³. La tercera ecuación de calibración se construyó a partir de las mediciones de la muestra de la madera de Kiri. La elección de la placa de yeso como representante del grupo 1 se debió a la gran cantidad de mediciones realizadas con ese material durante la campaña experimental. Esta muestra fue obtenida al inicio del estudio, mientras que las demás se incorporaron posteriormente con el objetivo de verificar los resultados. En el grupo 2, se continuó utilizando el panel compuesto debido a los buenos resultados obtenidos en la primera calibración. Para el tercer grupo, se generó una ecuación a partir de ambos materiales disponibles, seleccionándose finalmente aquella que ofreció la mejor aproximación.

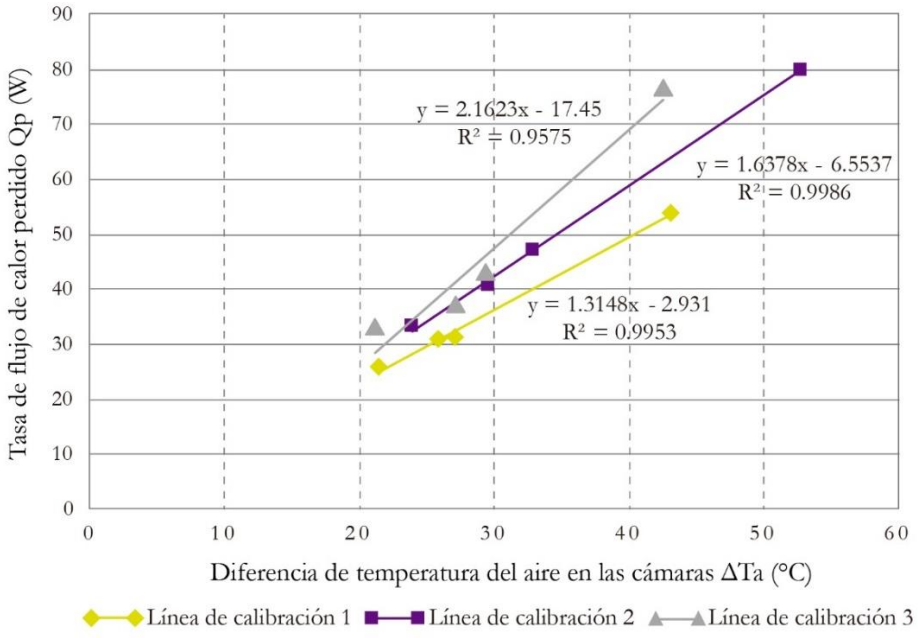


Figura 4: Tres ecuaciones de regresión lineal utilizadas en la segunda calibración de la CCC.

Las ecuaciones de calibración por regresión lineal se utilizaron para calcular la conductividad térmica de los materiales en los tres grupos. Los resultados se muestran en la Tabla 4. Se puede observar que el porcentaje de error en general disminuyó en comparación con los resultados obtenidos con la ecuación de calibración anterior. Para las tres placas de derivados de madera ensayadas en el grupo 1, con una entrada de flujo de calor de 100 W, el error varió entre -0.57 % y 10.91 %, mientras que para la placa de yeso el porcentaje de error disminuyó a 16,38 %. En el futuro, se podrían obtener mejores resultados en

este grupo mediante la construcción de una nueva ecuación basada en un material diferente. En el segundo grupo de materiales, al utilizar una entrada de flujo de calor de 53 W, el porcentaje de error fue inferior al 10 % tanto para el panel compuesto, como para el panel de textil cemento. La madera de Kiri, al tener la densidad aparente cercana al grupo 2 y 3 se ensayó con las dos ecuaciones lineales. Se observa que con la ecuación 2 y tasa de calor ingresado de 53 W el porcentaje de error es menor, sin embargo, medido con la ecuación 3 el error sigue por debajo de los 10 %.

Tabla 4: Comparación entre la conductividad térmica calculada con las tres ecuaciones de regresión lineal y la declarada de los materiales, junto con el porcentaje de error relativo

Material	Densidad aparente (ρ)	Tasa de calor ingresado Qi	Difer. de las temp. de aire ΔTa	Difer. de las temp. super. ΔTm	Conduct. térmica decl. λ	Conduct. térmica medida con la Ecuación 1 λm	Conduct. térmica medida con la Ecuación 2 λm	Conduct. térmica medida con la Ecuación 3 λm	Error relativo con signo
Unidad	kg/m^3	W	°C	°C	W/mK	W/mK	W/mK	W/mK	%
Placa de yeso	800	100	21,87	8,66	0,37	0,309			16,38
MDF	800	100	46,1	16,37	0,13	0,117			10,91
OSB	750	100	40,37	14,43	0,13	0,116			10,73
Placa de fenólico	700	100	45,37	16,07	0,12	0,121			-0,59
Panel ensambl.	530	53	29,53	18,80	0,046		0,042		8,44
Texacem	529	53	27.13	16,00	0,106		0,108		-1,58
Madera Kiri	450	53	27,03	11,57	0,09		0,086		4,13
	450	100	42,57	16,83				0,099	-9,55
Cartón corrug.	250	100	33,83	12,5	0,065			0,066	-0,86

Se deberían hacer más ensayos para mejorar las ecuaciones, especialmente la ecuación 1, y también habría que ensayar otros materiales, con densidades aparentes por encima de los 800 kg/m³ y también por debajo de los 250 kg/m³. Sin embargo, para materiales experimentales de densidades aparentes entre estos valores se podrían utilizar estas ecuaciones de calibración para analizar la conductividad térmica en el ámbito de la investigación.

Medición de la conductividad térmica de las placas de resíduos textiles y almidón de papa

Se produjeron cinco paneles con diferentes densidades aparentes, con porcentaje de residuos de textil y agua constante (24 % y 76 % p/p respectivamente) (Tabla 5). A cada uno de los paneles se le añadió diferente cantidad de almidón de papa (A.P.) en proporción de 28 %, 33 %, 40 %, 50 % y 60 % p/p del residuo de textil. La urea y el bórax se agregaron proporcionalmente al almidón: 17 % y 8 % p/p del almidón respectivamente.

Tabla 5: Dimensiones y densidades de las placas experimentales

Composición	Ancho (m)	Largo (m)	Espesor (m)	Masa (kg)	Densidad (kg/m^3)
A.P. 28%	0,480	0,575	0,0130	1,099	306,30
A.P. 33%	0,475	0,575	0,0130	1,169	329,24
A.P. 40%	0,470	0,565	0,0135	1,303	366,71
A.P. 50%	0,470	0,565	0,0135	1,539	429,30
A.P. 60%	0,455	0,550	0,0145	1,960	540,15

Al tener la densidad aparente más próxima a los materiales del grupo 3, se aplicó la ecuación de calibración 3. Los resultados se pueden observar en la tabla 6. Para la placa con mayor densidad se intentó aplicar la segunda ecuación de calibración, con el foco incandescente de 53 W. Sin embargo, en las dos pruebas no se logró que la diferencia entre el aire caliente y el frío sea igual o mayor a 20°C.

Tabla 6: Conductividad térmica de las placas experimentales aplicando la ecuación de calibración 3

Material	Tasa de flujo de calor ingresado (Qi, W)	Temperaturas del aire caja caliente (Tac, °C)	Diferencia de las temp. de aire (ΔTa, °C)	Temperaturas superficiales de la muestra caja caliente (Tmc, °C)	Diferencia de las temp. superficiales de las muestras (ΔTm, °C)	Conductividad térmica medida (λ, W/mK)
A.P. 28%	100	49,70	40,80	33,23	15,83	0,087
A.P. 33%	100	53,47	45,20	35,17	14,33	0,065
A.P. 40%	100	55,53	42,50	39,73	18,43	0,071
A.P. 50%	100	46,40	36,77	31,03	11,07	0,174
A.P. 60%	100	43,70	35,37	28,47	9,90	0,240

Los datos evaluados indican que, en general, la conductividad térmica aumenta con el incremento de la densidad aparente. Sin embargo, se observa una desviación en la muestra de menor densidad, en la que la conductividad térmica es mayor. Este comportamiento podría deberse a un error experimental, por lo que se recomienda realizar mediciones adicionales para confirmar los resultados. Un material con una conductividad térmica inferior a 0,1 W/m·K puede ser considerado un buen aislante térmico, ya que ofrece una baja tasa de transferencia de calor por conducción. De acuerdo a la norma IRAM 11601, el rango de los materiales aislantes convencionales (lana de vidrio, lana mineral, perlita, EPS, poliuretano y vermiculita) está entre 0,022 y 0,07 W/m·K. Por lo tanto, las muestras que contienen almidón de papa en concentraciones de 28 %, 33 % y 40 % p/p respecto al residuo textil, con conductividades térmicas inferiores a 0,1 W/m·K, se posicionan como materiales viables para uso como aislantes térmicos.

CONCLUSIONES

En este artículo se presenta el proceso de construcción y calibración de una Caja Caliente Calibrada de bajo costo, junto con la evaluación de la conductividad térmica de placas experimentales elaboradas con residuos textiles y almidón de papa. La CCC, construida con materiales económicos y mediante una metodología simple, resultó adecuada para ensayar materiales desarrollados por el grupo de investigación. El calor se suministró mediante bombillas incandescentes con potencias entre 40 W y 100 W. Se alcanzaron temperaturas en estado estable durante al menos tres horas para cada muestra, con una variación de temperatura de hasta 0,3°C en la superficie de las muestras. La diferencia de temperatura del aire entre las cámaras caliente y fría, en condiciones de estado estable fue siempre superior a 20°C.

Se obtuvo una ecuación preliminar de regresión lineal considerando un panel compuesto por vidrio simple de 4 mm y EPS de 15 mm. La ecuación de calibración se aplicó a materiales con conductividad térmica conocida (OSB, MDF, fenólico, placa de yeso, placa Texacem, madera de Kiri y cartón corrugado), y se observó que el porcentaje de error en la conductividad térmica estimada fue alto para la mayoría de las muestras. Solo en el caso de la madera de Kiri y la placa de textil cemento, cuando la tasa de flujo de calor ingresado Qi fue de 60 W y 53 W, se observaron errores menores a los 10 %.

Este hallazgo llevó a la hipótesis de que deberían desarrollarse y aplicarse diferentes ecuaciones de calibración de regresión lineal para materiales con densidades aparentes similares ρ (kg/m³). Se utilizaron tres ecuaciones de calibración para obtener la conductividad térmica de muestras con densidades aparentes de 700 kg/m³ a 800 kg/m³, de 500 kg/m³ a 700 kg/m³, y de 250 kg/m³ a 500 kg/m³. Para los materiales con mayor densidad, cuando la entrada de flujo de calor fue de 100 W, el error alcanzó hasta un 16,38 %. En el segundo grupo de materiales, con una entrada de flujo de calor de 53 W, el porcentaje de error fue de hasta 8,44 %. Para los materiales de menor densidad, con una entrada

de 100 W, el porcentaje de error llegó hasta -9,55 %. Con la ampliación en el número de ecuaciones de regresión lineal a futuro se podría ofrecer una mayor precisión en las mediciones.

Aunque se deben realizar más ensayos, la metodología de calibración puede utilizarse para determinar la conductividad térmica de materiales experimentales con densidades aparentes de 250 kg/m³ a 800 kg/m³. En el futuro, se podría mejorar la ecuación 1 para que el porcentaje de error sea más bajo que 10 %. También se deberían llevar a cabo nuevas campañas experimentales para materiales con densidades aparentes superiores a 800 kg/m³, así como inferiores a 250 kg/m³. También podría considerarse la aplicación de un medidor de flujo térmico para obtener el flujo de calor a través de las muestras y/o emplear una resistencia térmica para tener un mayor ajuste.

Se evaluaron cinco placas elaboradas con residuos textiles y almidón de papa, con densidades aparentes entre 306,3 y 540,15 kg/m³. En tres de ellas, la conductividad térmica fue inferior a 0,1 W/m·K, destacándose la placa de 329,24 kg/m³, que alcanzó el valor más bajo registrado: 0,065 W/m·K. Estas tres mezclas, con contenidos de almidón del 28 %, 33 % y 40 % p/p, se consideran prometedoras, por lo que se recomienda continuar con ensayos complementarios para confirmar sus propiedades térmicas y evaluar su viabilidad como material aislante.

RECONOCIMIENTOS

Kristina Atanasoska es estudiante del Doctorado en Ciencias Aplicadas Mención Ambiente y Salud (DCAAS, UNICEN, Argentina).

REFERENCIAS

Alhawari, A., y Mukhopadhyaya, P. (2022). Construction and Calibration of a Unique Hot Box Apparatus. *Energies*, *15*(13), Article 13. https://doi.org/10.3390/en15134677

American Society for Testing and Materials. (2019). *ASTM C1363: Standard Test Method for Thermal Performance of Building Materials and Envelope Assemblies by Means of a Hot Box Apparatus*.

American Society for Testing and Materials. (2022). *ASTM D5334: Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Rock by Thermal Needle Probe Procedure*. https://store.astm.org/d5334-22.html

Asdrubali, F., y Baldinelli, G. (2011). Thermal transmittance measurements with the hot box method: Calibration, experimental procedures, and uncertainty analyses of three different approaches. *Energy and Buildings*, *43*(7), 1618–1626. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.03.005

Asdrubali, F., D'Alessandro, F., y Schiavoni, S. (2015). A review of unconventional sustainable building insulation materials. *Sustainable Materials and Technologies*, *4*. https://doi.org/10.1016/j.susmat.2015.05.002

Basim Abu-Jdayil, Mourad, A.-H., Hittini, W., Hassan, M., y Hameedi, S. (2019). Traditional, state-of-the-art and renewable thermal building insulation materials: An overview. *Construction and Building Materials*, *214*, 709–735. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.102

Buratti, C., Belloni, E., Lunghi, L., y Barbanera, M. (2016). Thermal conductivity measurements by means of a new 'Small Hot-Box' apparatus: Manufacturing, calibration and preliminary experimental tests on different materials. *International Journal of Thermophysics*, *37*(5), 47. https://doi.org/10.1007/s10765-016-2052-2

Donmez Cavdar, A., Mengeloğlu, F., y Karakus, K. (2015). Effect of boric acid and borax on mechanical, fire and thermal properties of wood flour filled high density polyethylene composites. *Measurement*, *60*, 6–12. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.09.078

Ibrahim, K. A., Naz, M. Y., Sulaiman, S. A., Ghaffar, A., Jamil, Y., y Abdel-Salam, N. M. (2017). Effect of Urea and Borate Plasticizers on Rheological Response of Corn Starch. *Polymers*, *9*(9), Article 9. https://doi.org/10.3390/polym9090361

Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (1995). *IRAM 11559: Acondicionamiento térmico de edificios: Método de determinación de la conductividad térmica de los materiales de construcción mediante el aparato de placa caliente.*

Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (1997). *IRAM 11564: Acondicionamiento térmico de edificios: Método de determinación de la transmitancia térmica de los elementos de construcción mediante el aparato de la caja caliente.*

Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2002a). *IRAM 1860: Materiales aislantes térmicos. Método de ensayo de las propiedades de transmisión térmica en régimen estacionario, mediante el aparato de medición del flujo de calor.*

Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2002b). *IRAM 11601: Aislamiento térmico de edificios. Métodos de cálculo. Propiedades térmicas de los componentes y elementos de construcción en régimen estacionario.*

Kaya, B., Zorba, N. N., y Caner, C. (2023). Development of novel biodegradable film based on chitosan with borax (sodium tetraborate) and boron nitride and their biological activity. *International Journal of Food Science & Technology*, *58*(2), 890–897. https://doi.org/10.1111/ijfs.15743

Naciones Unidas-Hábitat. (2023). SDG 11: Sustainable cities and communities. https://onuhabitat.org.mx/index.php/el-mundo-esta-fallando-en-proporcionar-vivienda-adecuada

Organización Panamericana de la Salud. (2022). *Directrices de la OMS sobre vivienda y salud*. https://doi.org/10.37774/9789275325674

Pavel, C. C., y Blagoeva, D. T. (2018). *Competitive landscape of the EU's insulation materials industry for energy-efficient buildings* [Technical report by the Joint Research Centre (JRC)]. chrome-extension://oemmndcbldboiebfnladdacbdfmadadm/https://www.agendaconstructiilor.ro/files/files/kj1a28816enn.pdf

Secretaría de Desarrollo Territorial, Hábitat y Vivienda. (2023). *Registro Nacional de Barrios Populares (ReNaBaP)*. Argentina.gob.ar. https://www.argentina.gob.ar/habitat/integracion-socio-urbana/renabap

Shen, Z., Brooks, A. L., He, Y., Shrestha, S. S., y Zhou, H. (2021). Evaluating dynamic thermal performance of building envelope components using small-scale calibrated hot box tests. *Energy and Buildings*, *251*, 111342. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111342

Tejeda-Vázquez, R., Macias-Melo, E. V., Hernández-Pérez, I., Aguilar-Castro, K. M., y Serrano-Arellano, J. (2021). Empirical model of hygrothermal behavior of masonry wall under different climatic conditions using a hot box. *Energy and Buildings*, *249*, 111209. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111209

Villalba, A., Correa, E., Pattini, A., y Vicare, D. (2017). Hot-cool box calorimetric determination of the solar heat gain coefficient and the U-value of internal shading devices. *Energy Efficiency*, *10*. https://doi.org/10.1007/s12053-017-9544-1

Yajnes, M. E., Araneda, A. B., Busnelli, R., y Aranda, Y. (2023). Placa para acondicionamiento térmico y acústico de viviendas a partir de residuos textiles: De los obstáculos a los desafíos técnicos. *Innovación y Desarrollo Tecnológico y Social*, *5*, 1–15. https://doi.org/10.24215/26838559e040

EVALUATION OF THE THERMAL CONDUCTIVITY OF PANELS MADE FROM TEXTILE WASTE AND POTATO STARCH USING AN EXPERIMENTAL CALIBRATED HOT BOX

ABSTRACT Thermal conductivity is a key property in the development of building materials for energy-efficient architecture. In this study we present the design and calibration methodology of a low-cost calibrated hot box, used to measure the thermal conductivity of panels made from textile waste and potato starch. The device was calibrated using three linear regression equations, based on reference materials with apparent densities ranging from 250 to 800 kg/m³. The results showed errors close to 10 % when compared to the declared values of these materials, validating the instrument's accuracy in research contexts. Although further testing is needed for materials with densities outside the calibration range, the hot box proved to be a practical and reliable tool for thermal analysis of experimental materials. The experimental panels tested exhibited thermal conductivity values between 0,065 and 0,24 W/m·K, depending on their density. Of the five panels evaluated, three showed values within a potentially suitable range for use as insulating materials.

Keywords: calibration methodology, apparent density, construction materials, alternative insulation.