



Universidad de Valladolid

MÁSTER DE FÍSICA DE MATERIALES

2023-2024

# Laboratorio de Termodinámica de Materiales

*Facultad de Ciencias*

AISLAMIENTO TÉRMICO

AUTOR: GINÉS GONZÁLEZ GUIRADO

# Contents

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Objetivo experimental</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Fundamento Teórico</b>	<b>3</b>
3.1	Ley de Fourier . . . . .	3
<b>4</b>	<b>Procedimiento Experimental</b>	<b>5</b>
<b>5</b>	<b>Resultados experimentales</b>	<b>7</b>
5.1	Experiencia A . . . . .	7
5.2	Experiencia B . . . . .	7
5.3	Experiencia C . . . . .	10
<b>6</b>	<b>Conclusión</b>	<b>13</b>
	<b>References</b>	<b>14</b>

# 1 Introducción

En el informe que se presenta a continuación, se describen en detalle los procedimientos experimentales empleados para la evaluación de los coeficientes termodinámicos de los materiales Styropor, Madera y Cristal, teniendo en cuenta diferentes espesores. La sección dedicada al Fundamento Teórico aborda los cálculos utilizados para la determinación de dichos coeficientes, junto con las premisas iniciales empleadas como base para los cálculos. Posteriormente, en la sección destinada al Análisis de Resultados, se llevará a cabo una evaluación crítica de los valores obtenidos para estos coeficientes, destacando posibles fuentes de error mediante la comparación con datos documentados en la bibliografía. Por último, se presentarán las conclusiones sobre los resultados obtenidos y la metodología experimental empleada.

## 2 Objetivo experimental

El objetivo de este experimento es el estudio de las propiedades aislantes de diversos materiales. Para ello, se van a determinar sus coeficientes térmicos característicos y se examinará cómo el grosor del material afecta a estos coeficientes. Por tanto, los coeficientes termodinámicos a tener en cuenta son:

- Conductividad térmica,  $\mathbf{k}$   $\left(\frac{W}{m \cdot K}\right)$
- Coeficiente de transmisión calorífica,  $\mathbf{K}$   $\left(\frac{W}{m^2 \cdot K}\right)$
- Coeficiente de convección del aire interior,  $\mathbf{h_i}$   $\left(\frac{W}{m^2 \cdot K}\right)$
- Resistencia térmica,  $\mathbf{R}$   $\left(\frac{m^2 \cdot K}{W}\right)$

### 3 Fundamento Teórico

En esta sección, se va a explicar la base teórica en la que se fundamenta el diseño experimental para hallar los coeficientes anteriormente especificados.

#### 3.1 Ley de Fourier

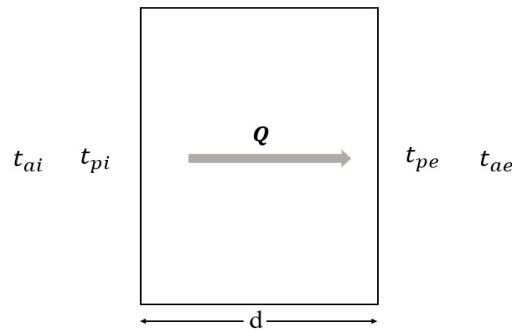


Figure 1: Ley de Fourier.

Si consideramos una placa (o pared) con una superficie de área  $S$  y espesor  $d$ , con temperaturas  $T_{pi}$  y  $T_{pe}$  en sus extremos, el flujo térmico por conducción, es decir, la cantidad de calor que se transmite en dirección perpendicular a través de sus paredes por unidad de tiempo, está determinado por la fórmula de Fourier:

$$\phi_p = k \cdot S \cdot \frac{T_{pi} - T_{pe}}{d} \quad (1)$$

Donde  $k$  representa la conductividad térmica del material, una propiedad positiva e intensiva que se relaciona únicamente con la composición del material y no con su configuración geométrica. Cuando consideramos que en ambos lados de la pared hay aire, como es común en las paredes de una casa, se desarrollan procesos de convección en cada lado. Estos fenómenos pueden analizarse de manera simplificada al suponer que la resistencia térmica para el intercambio de calor entre la pared y el aire se puede concentrar

en una capa de espesor  $d'$ . De esta manera, podemos aplicar la fórmula de Fourier para la conducción en esta capa límite. Si llamamos  $T_{ai}$  y  $T_{ae}$  a las temperaturas del aire en el interior y el exterior, respectivamente, podemos expresar el flujo para las capas interna y externa mediante las ecuaciones (2) y (3):

$$\phi_{ci} = k' \cdot S \cdot \frac{T_{ai} - T_{pi}}{d'_i} = h_i \cdot S \cdot (T_{ai} - T_{pi}) \quad (2)$$

$$\phi_{ce} = k' \cdot S \cdot \frac{T_{pe} - T_{ae}}{d'_e} = h_e \cdot S \cdot (T_{pe} - T_{ae}) \quad (3)$$

En estas expresiones, se ha designado con  $h_i$  y  $h_e$  a los coeficientes de convección del aire en el interior y exterior, respectivamente. Ahora, se considera el proceso global de transferencia de calor desde el interior hacia el exterior, es decir, se supone que la resistencia al flujo de calor es causada por dos capas de convección (con espesores  $d'_i$  y  $d'_e$ ) y la pared (con espesor  $d$ ), podemos expresar la fórmula de Fourier como la ecuación (4):

$$\phi = K \cdot S \cdot (T_{ai} - T_{ae}) \quad (4)$$

siendo  $K$  el coeficiente de transmisión calorífica, cuya relación con los coeficientes de convección interna y externa, el espesor de la pared y la conductividad térmica se expresa mediante la ecuación (5):

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{h_i} + \frac{d}{k} + \frac{1}{h_e} \quad (5)$$

En la ecuación (6), se expresa el valor inverso de  $K$ , el cual se suele denominar resistencia de transmisión calorífica o resistencia térmica,  $R$ .

$$R = \frac{1}{K} \quad (6)$$

## 4 Procedimiento Experimental

En la Figura 2, se muestra el equipo experimental.

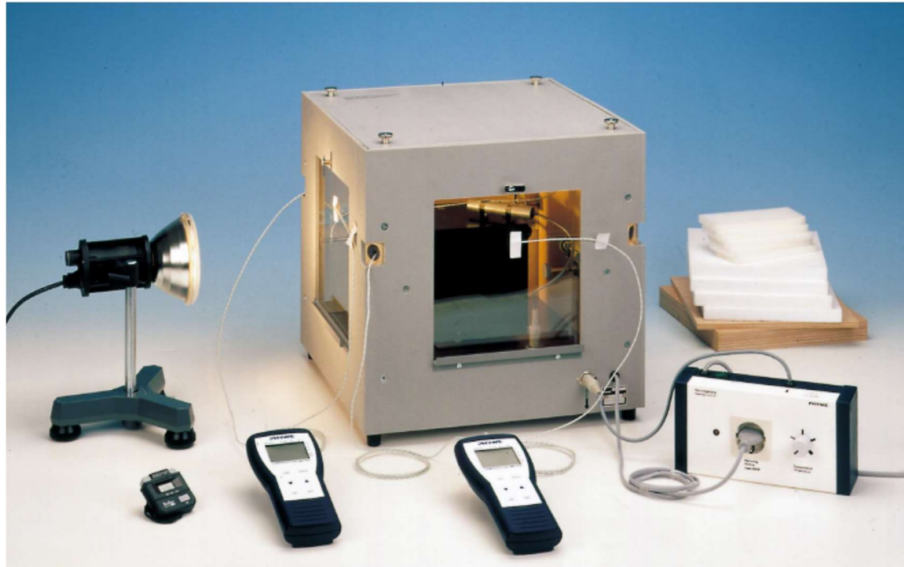


Figure 2: Equipo experimental.

En el transcurso de la experimentación, se implementaron diversos procedimientos experimentales con el propósito de analizar el comportamiento térmico de distintos materiales. A continuación, se describen en detalle los pasos llevados a cabo para la preparación y ejecución de las pruebas.

1. En primer lugar, se abre la tapa de la configuración experimental, y se colocaron cuatro tipos de paredes distintas: una de madera con 2 cm de espesor, otra de styropor con 2 cm de espesor, una tercera de cristal sencillo con 0,3 cm de espesor y, por último, una de cristal doble con 2 cm de espesor.
2. Las paredes fueron ajustadas a los marcos mediante tornillos.
3. La estructura fue cerrada y conectada al regulador de temperatura siguiendo las indicaciones de la Figura 2.

4. Se introdujo un termómetro por una de las aberturas laterales para medir la temperatura del aire en el interior ( $T_{ai}$ ), y otro fue colocado en el exterior para medir la temperatura ambiente ( $T_{ae}$ ).
5. Se fijaron termopares en el centro de cada pared desde el exterior, utilizando cinta adhesiva. Se tomó precaución al colocarlos en un punto de referencia común debido a la posible variación de temperaturas en la pared.
6. Se conectó y ajustó el regulador de temperatura aproximadamente en el centro del rango, permitiendo que la estructura alcanzara una temperatura estable de alrededor de 50 °C después de aproximadamente 1.5 horas.

Una vez que se logra un régimen estable, se realizaron las siguientes experiencias:

**A. Comparación de las Propiedades Aislantes de Cada Pared.** Mediante el empleo de termopares para registrar la temperatura de la superficie externa ( $T_{pe}$ ) de cada pared, se puede corroborar que la pared externa del material con mayor capacidad de aislamiento exhibirá una temperatura más baja, acercándose así más a la temperatura del aire externo ( $T_{ae}$ ). Esto señala una disminución en el flujo de calor desde la pared analizada hacia el entorno externo.

**B. Determinación de las Características Térmicas de las Paredes.** Se abre la tapa de la estructura, se conectan dos termopares a la cara interna de dos paredes, se cierra la estructura y se registran las temperaturas internas de las paredes ( $T_{pi}$ ) después de alcanzar un estado estable. Estas mediciones, junto con las temperaturas del aire, se utilizan para determinar los coeficientes de convección interna ( $h_i$ ), conductividad térmica ( $k$ ), coeficiente de transmisión térmica ( $K$ ) y resistencia térmica ( $R$ ), mediante las ecuaciones especificadas en la sección 3 del Fundamento Teórico.

**C. Influencia del Espesor en la Resistencia Térmica de la Pared.** Se realiza nuevamente el experimento B, empleando cuatro paredes de madera con espesores distintos (1, 2, 3 y 4 cm). Se constata que la resistencia térmica de la madera sigue aproximadamente un comportamiento lineal respecto al espesor.

## 5 Resultados experimentales

### 5.1 Experiencia A

Las medidas de las temperaturas de las paredes exteriores de cada material, obtenidos cuando el interior de la caja alcanza una temperatura estable, se presentan en la Tabla 1:

<b>Materiales</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
Aire Interior	$T_{ai} = 50.5 \pm 0.1$
Aire Exterior	$T_{ae} = 21.0 \pm 0.1$
Madera (2 cm)	$T_{Madera} = 29.4 \pm 0.1$
Styropor (2 cm)	$T_{Styropor} = 26.7 \pm 0.1$
Cristal Simple (0.3 cm)	$T_{C.simple} = 34.6 \pm 0.1$
Cristal Doble (2 cm)	$T_{C.doble} = 30.5 \pm 0.1$

Table 1: Medidas de temperatura durante la Experiencia A.

El material que exhiba una temperatura en la pared exterior más próxima a la temperatura ambiente, será el más aislante. En este caso, se puede comprobar que es el Styropor el cual, presenta una temperatura en la pared exterior de  $T_{Styropor} = 26.7^\circ\text{C} \pm 0.1$ .

### 5.2 Experiencia B

En esta etapa del experimento, se ha medido la temperatura interna de cada pared tras alcanzar un estado estable. Entonces, a partir de estas medidas y las del apartado anterior de la temperatura de la pared externa, se van a realizar los cálculos del coeficiente de convección interno ( $h_i$ ), la conductividad térmica ( $k$ ), el coeficiente de transmisión calorífica ( $K$ ) y la resistencia térmica ( $R$ ), mediante las ecuaciones expuestas en la sección 3. La Tabla 2 presenta los valores de temperatura para las paredes internas y externas de cada material.

Se puede notar que, a las temperaturas del aire en el interior de  $50,5^\circ\text{C}$  y en el exterior de  $21,0^\circ\text{C}$ , las variaciones en las temperaturas internas y externas de las paredes revelan las distintas propiedades térmicas de cada material. Un ejemplo destacado es el Styropor, reconocido por sus capacidades aislantes, que exhibe una temperatura en la pared exterior



Material	Espesor	$T_{ai}$ (C°)	$T_{ae}$ (C°)	$T_{pi}$ (C°)	$T_{pe}$ (C°)
Styropor	2 cm	50.5 $\pm$ 0.1	21.0 $\pm$ 0.1	49.4 $\pm$ 0.1	26.7 $\pm$ 0.1
Madera	2 cm	50.5 $\pm$ 0.1	21.0 $\pm$ 0.1	42.9 $\pm$ 0.1	29.9 $\pm$ 0.1
Cristal Simple	0.3 cm	50.5 $\pm$ 0.1	21.0 $\pm$ 0.1	41.6 $\pm$ 0.1	35.8 $\pm$ 0.1
Cristal Doble	2 cm	50.5 $\pm$ 0.1	21.0 $\pm$ 0.1	45.6 $\pm$ 0.1	30.5 $\pm$ 0.1

Table 2: Temperaturas para diferentes materiales y espesores.

más baja, registrando 26,7 °C, en contraste con la madera, que alcanza los 29,9 °C, ambas con un espesor de 2 cm. Esta disparidad sugiere que el Styropor demuestra ser más eficaz en retener el calor interno.

En primer lugar, considerando que se dispone del valor del coeficiente de convección externo,  $h_e = 8.1 \left( \frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$ , se procederá al cálculo del coeficiente de convección interno,  $h_i$ . Para ello, se igualarán las ecuaciones (2) y (3), ya que, en estado estacionario, el flujo de calor ( $\phi_{ci}$ ) entre el interior de la cámara y la pared interior del panel es igual al flujo de calor por convección ( $\phi_{ce}$ ) desde la parte exterior de la pared hasta el aire externo. A partir de esta igualdad, es posible determinar  $h_i$ , simplemente, despejando.

$$h_i = \frac{h_e(T_{pe} - T_{ae})}{T_{ai} - T_{pi}} \quad (7)$$

Ahora, como en régimen estacionario, el flujo de calor por convección ( $\phi_{ce}$ ) desde el exterior de la pared hacia el aire externo es equivalente al flujo de calor entre las paredes interior y exterior del panel ( $\phi_p$ ). Igualando las ecuaciones (1) y (3), se puede obtener una expresión para la conductividad térmica del material, en términos del espesor ( $d$ ), como sigue:

$$k = \frac{d \cdot h_e(T_{pe} - T_{ae})}{T_{pi} - T_{pe}} \quad (8)$$

Una vez conocidos los coeficientes de convección del aire interior y exterior  $h_i$ ,  $h_e$  y la conductividad térmica del material ( $k$ ), podemos calcular el coeficiente de transmisión calorífica ( $K$ ) a partir de la ecuación (5):

$$K = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{d}{k} + \frac{1}{h_e}} \quad (9)$$

Partiendo de la ecuación (6), podemos escribir una ecuación para la resistencia térmica como la inversa de la ecuación (9).

$$R = \frac{1}{K} = \frac{T_{ai} - T_{ae}}{h_e(T_{pe} - T_{ae})} \quad (10)$$

De esta forma, con las temperaturas de la Tabla 2, se pueden calcular los coeficientes cuyos resultados para cada uno de los materiales se muestran en la Tabla 3.

Material	Espesor	$h_i \left( \frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$	$K \left( \frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$	$k \left( \frac{W}{m \cdot K} \right)$	$R \left( \frac{m^2 \cdot K}{W} \right)$
Styropor	2 cm $\pm$ 0.1	41.97 $\pm$ 3.89	1.6 $\pm$ 0.18	0.0407 $\pm$ 0.002	0.64 $\pm$ 0.075
Madera	2 cm $\pm$ 0.1	9.5 $\pm$ 0.16	2.44 $\pm$ 0.18	0.111 $\pm$ 0.006	0.41 $\pm$ 0.03
Cristal Simple	0.3 cm $\pm$ 0.1	13.47 $\pm$ 0.18	4.06 $\pm$ 1.92	0.062 $\pm$ 0.21	0.25 $\pm$ 0.12
Cristal Doble	2 cm $\pm$ 0.1	15.7 $\pm$ 0.36	2.61 $\pm$ 0.195	0.102 $\pm$ 0.05	0.38 $\pm$ 0.02

Table 3: Coeficientes termodinámicos para diferentes materiales y espesores.

Como era de anticipar, los dos materiales que exhibieron una menor conductividad térmica fueron el Styropor y la Madera, con valores experimentales próximos a los proporcionados en el manual del equipo [1]. Según [2], la madera suave tiene una conductividad térmica del orden de 0.115  $W/m \cdot K$ , mientras que el vidrio celular presenta una conductividad térmica del orden de 0.058  $W/m \cdot K$ . Por lo tanto, podemos clasificar los materiales empleados en estos experimentos como estos dos mencionados. En cuanto a otros tipos de vidrio, como los utilizados en ventanas, es común encontrar en la literatura un valor de 0.7  $W/m \cdot K$ , mientras que los vidrios Pyrex, fabricados con borosilicato templado de alta calidad y excelente resistencia a impactos mecánicos, presentan una conductividad térmica entre 1 y 1.4  $W/m \cdot K$ . Por otro lado, los vidrios del tipo Crown, empleados en óptica para lentes y otros componentes, tienen una conductividad térmica de 1.05  $W/m \cdot K$ . En este sentido, la caracterización del Cristal Doble permanece sin determinar, ya que se desconoce la naturaleza específica de la muestra.

### 5.3 Experiencia C

De manera análoga al experimento B, una vez que se ha alcanzado el estado estacionario, en el experimento C se procede a medir tanto la temperatura interior como exterior de cada pared de madera con diversos espesores. En la Tabla 4, se presentan los valores correspondientes a las temperaturas de las paredes internas y externas de cada una de las paredes de madera con distintos grosores.

Material	Espesor	$T_{ai}$ (C°)	$T_{ae}$ (C°)	$T_{pi}$ (C°)	$T_{pe}$ (C°)
Madera	1 cm	50.4 $\pm$ 0.1	18.6 $\pm$ 0.1	40.3 $\pm$ 0.1	31.0 $\pm$ 0.1
Madera	2 cm	50.4 $\pm$ 0.1	18.6 $\pm$ 0.1	41.5 $\pm$ 0.1	28.3 $\pm$ 0.1
Madera	3 cm	50.4 $\pm$ 0.1	18.6 $\pm$ 0.1	42.6 $\pm$ 0.1	26.2 $\pm$ 0.1
Madera	4 cm	50.4 $\pm$ 0.1	18.6 $\pm$ 0.1	43.2 $\pm$ 0.1	24.1 $\pm$ 0.1

Table 4: Temperaturas para Madera a diferentes espesores.

Se puede observar, que la madera más delgada tiene una temperatura más baja en la pared interna, mientras que presenta una temperatura más elevada en la pared externa. Para la madera de 1 cm, la temperatura en la pared interna es de 40,3 °C, mientras que en la pared externa es de 31,0 °C. A medida que aumenta el grosor de la madera, se observa un cambio significativo en el comportamiento térmico. Con una madera de 4 cm, la temperatura en la pared interna aumenta a 43,2 °C, acercándose a la temperatura del aire interior de 50,4 °C, y la temperatura en la pared exterior, 24,1 °C, se mantiene más cercana a la temperatura ambiente, demostrando una mayor eficacia en la reducción de la transferencia de calor al entorno exterior con este espesor. En la Figura 3, se presentan las temperaturas de las paredes interna y externa y su relación con el grosor de la madera, donde se puede verificar que la variación es lineal con el espesor.

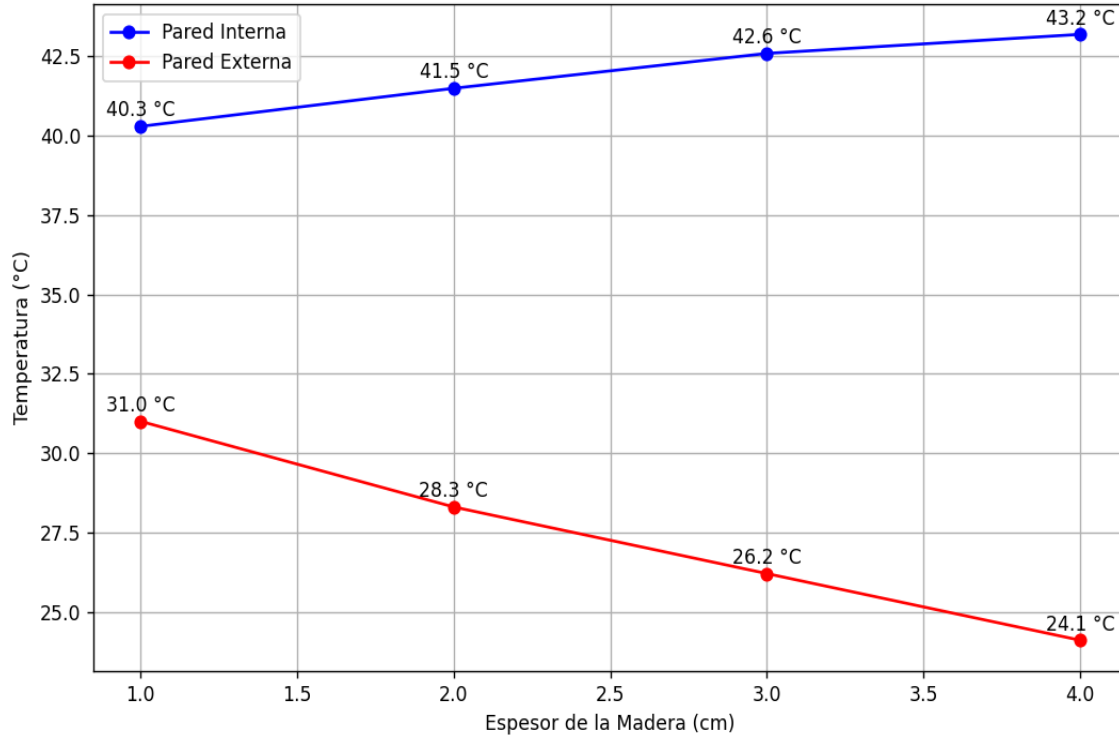


Figure 3: Relación entre Espesor de la Madera y Temperaturas de las Paredes.

Con base en estas mediciones, se procederá al cálculo del coeficiente de convección interna ( $h_i$ ), la conductividad térmica ( $k$ ), el coeficiente de transferencia de calor ( $K$ ) y la resistencia térmica ( $R$ ), utilizando las ecuaciones previamente mencionadas en el experimento B, específicamente, las ecuaciones (7)-(10). Los resultados obtenidos se detallan en la Tabla 5.

Material	Espesor	$h_i \left( \frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$	$K \left( \frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$	$k \left( \frac{W}{m \cdot K} \right)$	$R \left( \frac{m^2 \cdot K}{W} \right)$
Madera	1 cm $\pm$ 0.1	$9.9 \pm 0.2$	$3.1 \pm 0.3$	$0.108 \pm 0.008$	$0.32 \pm 0.04$
Madera	2 cm $\pm$ 0.1	$8.8 \pm 0.2$	$2.5 \pm 0.3$	$0.119 \pm 0.008$	$0.40 \pm 0.07$
Madera	3 cm $\pm$ 0.1	$7.9 \pm 0.2$	$1.94 \pm 0.3$	$0.113 \pm 0.008$	$0.52 \pm 0.07$
Madera	4 cm $\pm$ 0.1	$6.2 \pm 0.2$	$1.4 \pm 0.2$	$0.093 \pm 0.008$	$0.71 \pm 0.09$

Table 5: Coeficientes termodinámicos de la Madera en diferentes espesores.

A partir de los resultados de esta tabla, se puede comprobar como la conductividad térmica ( $k$ ), se mantiene prácticamente constante, independientemente del grosor de la madera, dado que este valor es inherente al material. Sin embargo, el coeficiente de transferencia de calor ( $K$ ) exhibe una disminución a medida que aumenta el espesor, ya

que existe una relación inversamente proporcional entre ambos, según la ecuación (9). Este resultado respalda la Ley de Fourier, indicando que el flujo de calor decrece al incrementar el espesor de los materiales. En consecuencia, para lograr un aislamiento más efectivo, se requiere un mayor espesor.

De acuerdo con la referencia [2], las conductividades térmicas de la madera pueden variar según el tipo específico de madera considerado. Para maderas suaves, como el abeto y el pino, la conductividad térmica se sitúa alrededor de  $0.115 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ , mientras que para maderas más duras, como el roble, la conductividad térmica es de aproximadamente  $0.159 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ . Por lo tanto, la madera examinada en este estudio puede caracterizarse como madera suave, ya que su conductividad térmica ronda los  $0.11 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ . La Figura 4 muestra la relación entre la resistencia térmica y el espesor de la madera, confirmando que la resistencia al flujo de energía en forma de calor a través de la madera aumenta de manera lineal con el espesor, como era de esperar.

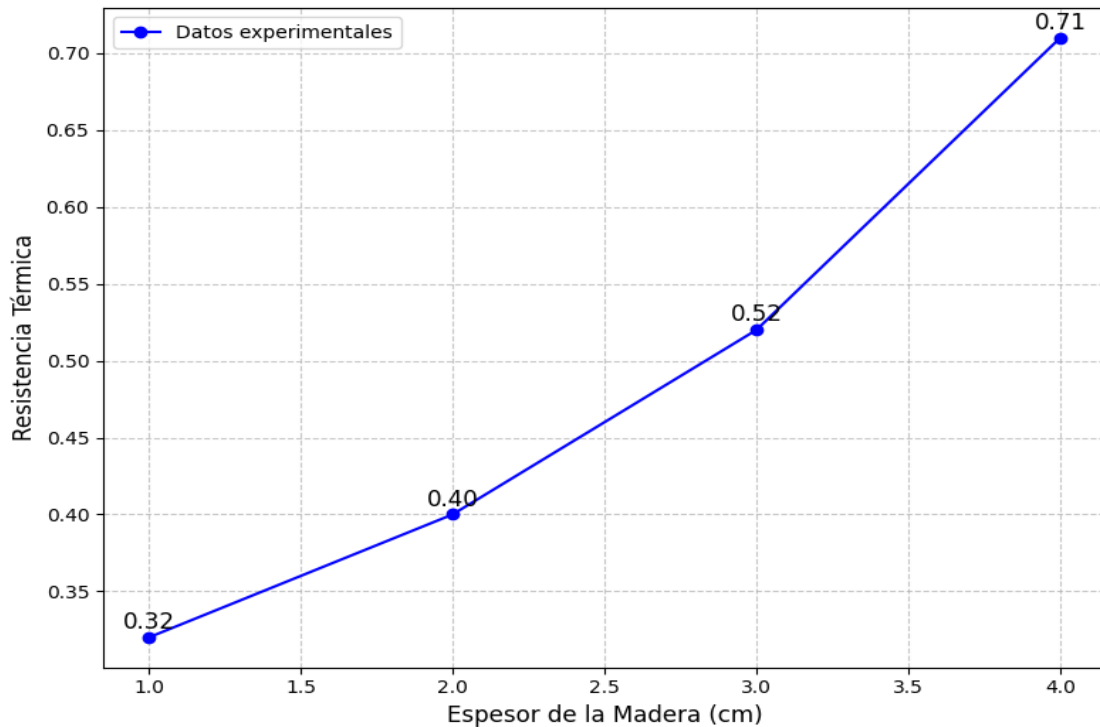


Figure 4: Relación entre Espesor y Resistencia Térmica de la Madera.

## 6 Conclusión

En este informe, se ha llevado a cabo una evaluación experimental de los coeficientes termodinámicos de los materiales Styropor, Madera y Cristal en distintos espesores. El objetivo fundamental fue medir los coeficientes térmicos característicos y analizar la influencia del espesor del material en estos coeficientes.

En la experiencia A, se compararon las propiedades aislantes de los materiales mediante la medición de las temperaturas de las paredes exteriores. Styropor demostró ser el material más eficaz en términos de aislamiento, exhibiendo una temperatura en la pared exterior significativamente inferior en comparación con los otros materiales.

En la experiencia B, se realizaron mediciones más detalladas para evaluar los coeficientes termodinámicos. Se calcularon el coeficiente de convección interno ( $h_i$ ), la conductividad térmica ( $k$ ), el coeficiente de transmisión calorífica ( $K$ ) y la resistencia térmica ( $R$ ). Los resultados mostraron coherencia con las propiedades conocidas de los materiales, validando la efectividad del método experimental.

En la experiencia C, se exploró la influencia del espesor en la resistencia térmica de la madera. Los resultados revelaron una relación lineal entre el espesor y la resistencia térmica, confirmando la Ley de Fourier y destacando la importancia del espesor en el rendimiento térmico.

En resumen, este estudio experimental proporcionó información valiosa sobre las propiedades térmicas de los materiales y la relación con el espesor. Los resultados obtenidos son coherentes con la teoría y la literatura conocida sobre conductividad térmica y transferencia de calor en diversos materiales. Este tipo de análisis resulta fundamental para el diseño eficiente de aislamientos y materiales de construcción en aplicaciones prácticas.

## References

- [1] PHYWE SYSTEM GMBH & Co . KG, *Laboratory Experiments: Heat Insulation / Heat Conduction*, D-37070 Gottingen. LEP 3.6.03-00.
- [2] Y. A. Cengel and A. J. Ghajar, *Transferencia de calor y masa*, vol. 53. McGraw-Hill Interamericana, 2007.

## Apendice A - CALCULOS EN PYTHON

```
1 import numpy as np
2
3 def Calcular_coeficientes(T_ai, T_ae, T_pi, T_pe, he, d, n):
4     hi = np.zeros(n)
5     ka = np.zeros(n)
6     Kad = np.zeros(n)
7     R = np.zeros(n)
8
9     for j in range(n):
10         # Calculos de los coeficientes usando los m todos del
11         # PROGRAMA 2
12         hi[j] = he * (T_pe[j] - T_ae[j]) / (T_ai[j] - T_pi[j])
13         ka[j] = d[j] * he * (T_pe[j] - T_ae[j]) / (T_pi[j] -
14             T_pe[j])
15         Kad[j] = 1 / (1 / hi[j] + d[j] / ka[j] + 1 / he)
16         R[j] = 1 / Kad[j]
17
18         # Propagacion de errores para hi
19         sigma_hi = hi[j] * np.sqrt((0.1 / (T_pe[j] -
20             T_ae[j]))**2 + (0.1 / (T_ai[j] - T_pi[j]))**2)
21
22         # Propagacion de errores para ka
23         sigma_ka = ka[j] * np.sqrt((0.1 / (T_pi[j] -
24             T_pe[j]))**2 + (0.001 / d[j])**2)
25
26         # Propagacion de errores para Kad
27         sigma_Kad = Kad[j] * np.sqrt((sigma_hi / hi[j])**2 +
28             (sigma_ka / ka[j])**2 + (0.001 / d[j])**2)
29
30         # Propagacion de errores para R
31         sigma_R = sigma_Kad / Kad[j]**2
```



```

27
28     print('Material ', j, ':')
29     print('hi = {:.4f} +/- {:.4f}'.format(hi[j], sigma_hi))
30     print('k = {:.4f} +/- {:.4f}'.format(ka[j], sigma_ka))
31     print('K = {:.4f} +/- {:.4f}'.format(Kad[j], sigma_Kad))
32     print('R = {:.4f} +/- {:.4f}'.format(R[j], sigma_R))
33     print()
34
35 def Calcular_coeficientes_madera(T_ai, T_ae, T_pi, T_pe, he, d,
36     n):
37     hi = np.zeros(n)
38     ka = np.zeros(n)
39     Kad = np.zeros(n)
40     R = np.zeros(n)
41
42     for j in range(n):
43
44         # Calculos de los coeficientes
45         hi[j] = he * (T_pe[j] - T_ae[j]) / (T_ai[j] - T_pi[j])
46         ka[j] = d[j] * he * (T_pe[j] - T_ae[j]) / (T_pi[j] -
47             T_pe[j])
48         Kad[j] = 1 / ((1 / hi[j]) + (d[j] / ka[j]) + (1 / he))
49         R[j] = 1 / Kad[j]
50
51         # Propagacion de errores para hi
52         sigma_hi = hi[j] * np.sqrt((0.1 / (T_pe[j] -
53             T_ae[j]))**2 + (0.1 / (T_ai[j] - T_pi[j]))**2)
54
55         # Propagacion de errores para ka
56         sigma_ka = ka[j] * np.sqrt((0.1 / (T_pi[j] -
57             T_pe[j]))**2 + (0.001 / d[j])**2)

```

```

55     # Propagacion de errores para Kad
56     sigma_Kad = Kad[j] * np.sqrt((sigma_hi / hi[j])**2 +
57                                     (sigma_ka / ka[j])**2 + (0.001 / d[j])**2)
58
59     # Propagacion de errores para R
60     sigma_R = sigma_Kad / Kad[j]**2
61
62     print('Material ', j, ':')
63     print('hi = {:.4f} +/- {:.4f}'.format(hi[j], sigma_hi))
64     print('k = {:.4f} +/- {:.4f}'.format(ka[j], sigma_ka))
65     print('K = {:.4f} +/- {:.4f}'.format(Kad[j], sigma_Kad))
66     print('R = {:.4f} +/- {:.4f}'.format(R[j], sigma_R))
67     print()
68
69 n = 4
70 he = 8.1
71
72 # Temperaturas y espesor para diferentes materiales
73
74 T_ai = np.array([50.5, 50.5, 50.5, 50.5]) # Temperatura aire
75     interior
76 T_ae = np.array([21.0, 21.0, 21.0, 21.0]) # Temperatura aire
77     exterior
78 T_pi = np.array([49.4, 42.9, 41.6, 45.6]) # Temperatura pared
79     interior
80 T_pe = np.array([26.7, 29.9, 35.8, 30.5]) # Temperatura pared
81     exterior
82 d = np.array([0.02, 0.02, 0.003, 0.02])
83
84 Calcular_coeficientes(T_ai, T_ae, T_pi, T_pe, he, d, n)
85
86 # Temperaturas y espesor diferente para madera

```

```

82
83 T_ai = np.array([50.4, 50.4, 50.4, 50.4])    # Temperatura aire
      interior
84 T_ae = np.array([18.6, 18.6, 18.6, 18.6])    # Temperatura aire
      exterior
85 T_pi = np.array([40.3, 41.5, 42.6, 43.2])    # Temperatura pared
      interior
86 T_pe = np.array([31.0, 28.3, 26.2, 24.1])    # Temperatura pared
      exterior
87 d = np.array([0.01, 0.02, 0.03, 0.04])
88
89 Calcular_coeficientes_madera(T_ai, T_ae, T_pi, T_pe, he, d, n)

```

Listing 1: Código Python