

## DE TAL PALO TAL FIBRA, MATERIALES ABSORBENTES ACÚSTICOS Y AISLANTES TÉRMICOS A BASE DE MADERA SOSTENIBLE

PACS: 43,55Ev

Andosilla Herráiz, Paula; Navacerrada Saturio, María Ángeles  
Grupo de Acústica Arquitectónica, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad Politécnica de Madrid, Avda. Juan de Herrera 4, 28040 Madrid (Spain)  
E-mail: paula.andosillah@alumnos.upm.es

**Palabras Clave:** fibras de madera, adhesivo natural, aislamiento acústico, aislamiento térmico, economía circular.

### ABSTRACT.

The use of thermal insulation and acoustic absorbers in architecture is key to guaranteeing comfort and social well-being. However, the most common products manufactured for this use usually employ elements and processes harmful to the environment. In this sense, wood fiber is an alternative to conventional wool. To analyze its characteristics, a series of acoustic and thermal panels have been manufactured from leftover hardwood of national origin, using a natural lignin adhesive from the wood itself and different manual methods.

In this project, the measurements' results of the sound absorption coefficient, thermal conductivity, and dynamic stiffness of these samples are compared with a reference mineral wool. From there, and following the Technical Code, possible applications and finishes of the manufactured panels are proposed.

### RESUMEN.

El uso de aislantes térmicos y absorbentes acústicos en arquitectura es clave para garantizar el confort y bienestar social. Sin embargo, la fabricación de los productos más habituales para este uso suele emplear elementos y procesos perjudiciales para el medio ambiente. En este sentido, la fibra de madera supone una alternativa a las lanas convencionales. Para poder analizar sus características se han fabricado una serie de paneles acústicos y térmicos a partir de madera de frondosa sobrante de origen nacional, utilizando un adhesivo natural de lignina de la propia madera y diferentes métodos manuales.

En este trabajo, se comparan los resultados de las mediciones del coeficiente de absorción sonora, de la conductividad térmica y de la rigidez dinámica de estas muestras con una lana mineral de referencia. A partir de ahí, y de acuerdo con el Código Técnico, se proponen posibles aplicaciones y acabados de los paneles fabricados.

### 1. INTRODUCCIÓN

Más del 60% de los recursos naturales se destinan a las ciudades y áreas metropolitanas [1]. Esto va ligado inevitablemente a una economía circular de solo el 13% de la economía mundial [2]. Datos como estos han sido objeto de estudio por economistas y arquitectos como Walter Stahel [3]. A esta preocupación por el medio ambiente se unen cuestiones relativas a nuestra salud. Al año la contaminación acústica provoca en Europa 12.000 muertes prematuras, además de cuantiosas cardiopatías y otros efectos negativos [4]. Ambas situaciones pueden englobarse dentro del modelo "economía del donut" desarrollado por Kate Raworth. El modelo establece dos límites entre los que se debe desarrollar la vida sin impedir ni reducir las posibilidades de desarrollo del medio y sin ver reducido nuestro bienestar [5].

Aquí es donde entra la arquitectura y, en concreto la acústica, con la fabricación de nuevos materiales sostenibles que sustituyan los convencionales más contaminantes. Son ejemplo de ello el vidrio celular, la tela vaquera reciclada y el caucho reciclado. En este trabajo se pretende continuar esta labor fabricando un producto aislante térmico y absorbente acústico, comparable a los materiales actuales, partiendo de fibra de madera de origen sostenible y haciendo uso de adhesivos naturales. La materia prima fue proporcionada por la empresa Betanzos HB. De las muestras se midieron el coeficiente de absorción, la conductividad térmica y la rigidez dinámica.

## 2. MATERIAL

La fibra de madera y el adhesivo orgánico proceden de madera excedente y descartes de empresas madereras y forestales en el territorio de Galicia. Se trata de madera de Eucalipto (*Eucalyptus globulus*) en un 90% y un 10% de otras frondosas.

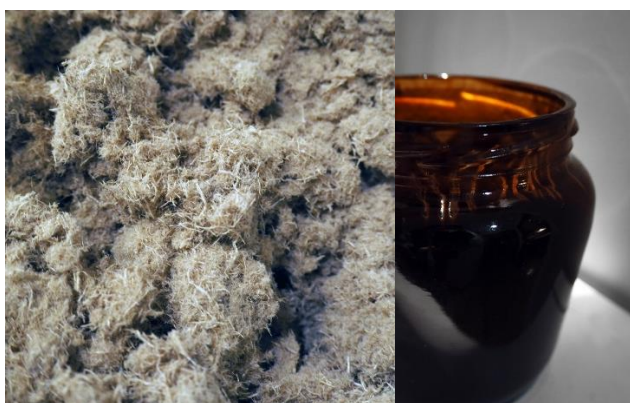


Figura 1 – Fibra de madera y adhesivo orgánico.

Para obtener la fibra se parte de un astillado de la madera y una posterior limpieza y cocción por la cual se obtiene el adhesivo. Un desfibrador mecánico completa el proceso de fabricación final de la fibra [6].

A la hora de trabajar el material para fabricar el producto final se deberán tener en cuenta las características de esta madera y sus ventajas frente a otras. Las frondosas son maderas semiduras y semipesadas por lo que su densidad es mayor que la que presentan maderas blandas o coníferas, ofreciendo mayor aislamiento acústico y térmico. En cuanto a su estructura macroscópica se distinguen longitudinalmente dos tipos de células, las fibras y los vasos. Las primeras contienen 3 elementos interesantes por las propiedades que aportan a la madera. La celulosa contribuye a la absorción de agua y a la resistencia; mientras que la hemicelulosa actúa como su soporte y varía su estructura en frondosas y coníferas. En nuestro caso presenta mejor comportamiento a degradación en disoluciones alcalinas ( $\text{pH} > 7$ ), dato a tener en cuenta para tratamientos por inmersión. Por último, la lignina, responsable de la elasticidad y unión de células, constituye el principal componente del adhesivo natural y proporciona resistencia a impacto, compresión y doblado. Además, por su capacidad termoplástica, a altas temperaturas debilita los enlaces facilitando la separación de materiales y permitiendo un buen desarrollo de la economía circular. Las segundas células estructurales, los vasos, participan en propiedades como densidad, secado e impregnación de sustancias por las perforaciones y la ausencia de membrana que los caracteriza, y por la conexión entre ellas en forma de canal. Transversalmente, estas células se denominan poros. Completando la estructura se encuentra la Parénquima axial, que generalmente abunda en mayor medida en frondosas y actúa de forma similar a los vasos [7, 8, 9, 10].

Según esta estructura, las especies de madera empleadas manifiestan vasos medio gruesos lo que supone mayor porosidad que otras con poros de menor tamaño, afectando a la absorción del sonido. Por otro lado, se tratan de fibras cortas que frente a las fibras largas de maderas blandas tienen mejor resistencia, pero mayor dificultad para generar enlaces.

### 3. TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN

#### 3.1. Coeficiente de absorción

Para realizar la medida del coeficiente de absorción sonora de las muestras se utilizó una pistola de impedancia de Microflown Technologies. Esta pistola de impedancia consta de un pequeño altavoz esférico de 15 cm de diámetro como fuente de sonido, una sonda de PU como sensor, así como un soporte de mano que permite al usuario manejar toda la estructura y, al mismo tiempo, mantener una distancia constante de 27 cm entre la sonda y el altavoz [11].

#### 3.2. Conductividad térmica

Por otro lado, se midió la conductividad térmica mediante un medidor de flujo de calor, modelo HFM 436 Lambda [12]. Este sistema se basa en la ley de Fourier del régimen estacionario por la cual, conocido el espesor  $e$  (m), el flujo de calor  $q$  (W/m<sup>2</sup>) y la diferencia de temperatura entre las dos placas del equipo  $\Delta T$  (K), se determina la conductividad térmica del material  $\lambda$  (W/(m·K)) a partir de la siguiente expresión.

$$q = \lambda \frac{\Delta T}{e}. \quad (1)$$

#### 3.3. Rigidez dinámica

Se midió también la frecuencia de resonancia  $f_0$  (Hz) con un acelerómetro Brüel and Kjær, obteniendo la rigidez dinámica del material  $s'$  (MN/m<sup>3</sup>) según indica la norma UNE EN 29052-1:1994 [13].

$$s' = 4 \cdot \pi^2 \cdot 8kg/m^2 \cdot f_0^2. \quad (2)$$

## 4. RESULTADOS

En este apartado se describen los distintos métodos de fabricación del material y su comportamiento acústico y térmico. Se apostó por una elaboración manual, sin maquinaria auxiliar y un uso responsable de energía y recursos; empleando un molde desmontable y reutilizable de materiales reciclados.

#### 4.1. Primera etapa

Durante esta etapa se pretendía conseguir aglomerar las fibras componiendo una estructura estable. Para ello, se hizo uso de agua como aglutinante con pH neutro. Resultaron de este proceso dos muestras de base cuadrada de 25 cm.

##### Muestra 1\_Panel

Esta muestra contaba con un espesor de 1,5 cm, igual que el que presentan materiales absorbentes comunes. La proporción de fibra de madera era mayor a la de agua en 160:1. Las Figuras 2, 3 y 4 muestran el proceso de fabricación y las fotos de las muestras obtenidas.



Figura 2 – Diagrama de fabricación de la Muestra 1\_Panel.



Figura 3 – Mezcla, moldeado y Muestra 1\_Panel.



Figura 4 – Espesor de Muestra 1\_Panel.

#### Muestra 2\_Lámina

Esta muestra incluye un triturado y prensado en el proceso con el fin de conseguir un mejor entrelazado de fibras que permita manipular el panel sin rotura. Para ello, se aumentó la cantidad de agua en proporción 33:1 y se dio un espesor mucho menor (ver Figuras 5, 6 y 7).

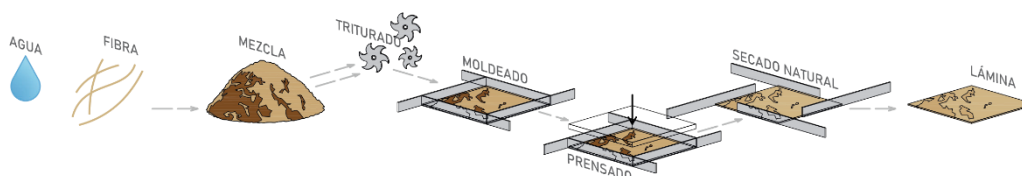


Figura 5 – Diagrama de fabricación de la Muestra 2\_Lámina.



Figura 6 – Mezcla, triturado, moldeado y Muestra 2\_Lámina.

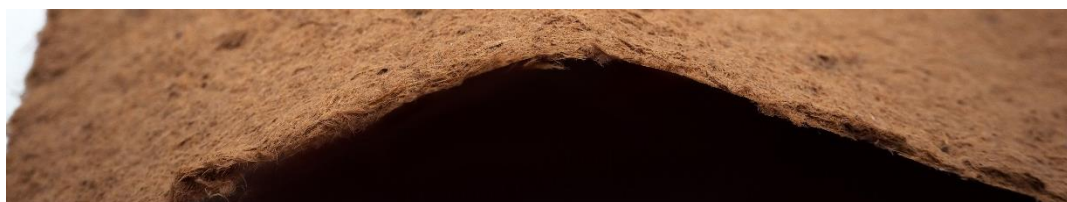


Figura 7 – Espesor de Muestra 2\_Lámina.

Sin embargo, el agua no supuso un buen aglomerante y provocó la aparición de moho, como se muestra en las fotos de la Figura 8.



Figura 8 – Rotura en muestras 1 y 2; y moho en muestras 1 y 2.

#### 4.2. Segunda etapa

Puesto que en la primera etapa no se logra una gran consistencia de las muestras y para evitar la aparición de moho se incorpora el adhesivo de lignina como aglutinante.

##### Muestra 3\_Sándwich

El método de fabricación en este caso consistió en intercalar capas de fibra y adhesivo en finos hilos en zigzag sobre la superficie en varias direcciones formando una malla, como muestra el diagrama de la Figura 9. De esta forma, el adhesivo se filtra por la muestra constituyendo un esqueleto tridimensional de 1,5 cm, rígido y manipulable. La ausencia de agua permitió un más rápido secado evitando el moho. El resultado se muestra en las fotos de las Figuras 10 y 11.

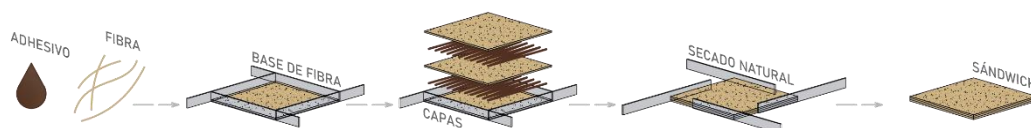


Figura 9 – Diagrama de fabricación de la Muestra 3\_Sándwich.



Figura 10 – Aplicación de capa de adhesivo, de fibra y Muestra 3\_Sándwich.



Figura 11 – Espesor de Muestra 3\_Sándwich.

##### Muestra 4\_Sándwich 2

El buen resultado del proceso del Sándwich dio pie a aumentar el espesor a 2,5 cm (ver Figuras 12 y 13).

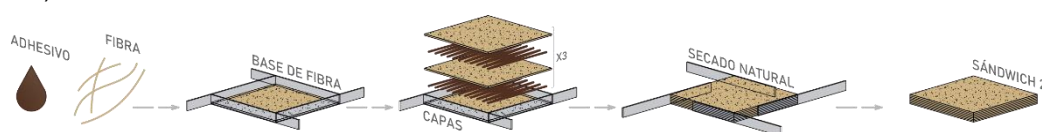


Figura 12 – Diagrama de fabricación de la Muestra 4\_Sándwich 2.



Figura 13 – Muestra 4\_Sándwich 2.

### 4.3. Estudio comparativo

En la Tabla 1 se recogen los valores del coeficiente de absorción de las muestras de la primera etapa junto con una lana mineral de 1,5 cm. Los resultados indican que el coeficiente de absorción del Panel de 1,5 cm es comparable al de una lana mineral del mismo espesor. Del mismo modo, en el Sándwich se aprecian valores similares, por lo que el adhesivo no altera sus capacidades acústicas. No obstante, un mayor espesor aumenta la absorción, siendo comparable a una lana mineral del mismo espesor.

Tabla 1 – Valores de coeficiente de absorción frecuencia (Hz)/muestra

Frecuencia (Hz)	Coeficientes de absorción $\alpha$					
	Lana mineral (1,5 cm)	Panel (1,5 cm)	Sándwich (1,5 cm)	Lámina	Sándwich 2 (2,5 cm)	Lana mineral (2,5 cm)
125	0,11	0,18	0,14	0,28	0,13	0,14
250	0,08	0,18	0,13	0,19	0,13	0,08
500	0,06	0,11	0,09	0,15	0,17	0,16
1000	0,23	0,19	0,13	0,15	0,62	0,57
2000	0,60	0,65	0,38	0,46	0,83	0,87
4000	0,95	0,86	0,89	0,47	0,97	0,94

Como muestra la Tabla 3, la conductividad térmica del Panel y del Sándwich es menor que 0,05 W/(m·K), por lo que pueden clasificarse como aislantes y son comparables a una lana mineral de 1,5 cm. El Sándwich 2, en cambio, por mayor densidad supera ligeramente los 0,05 W/(m·K).

Tabla 2 – Valores de la conductividad térmica medidos a las temperaturas de 10, 15 y 20°C

Temperatura (°C)	Conductividad térmica $\lambda$ (W/(m·K))				
	Lana mineral (1,5 cm)	Panel (1,5 cm)	Sándwich (1,5 cm)	Lana mineral (2,5 cm)	Sándwich 2 (2,5 cm)
10	0,030	0,044	0,045	0,033	0,051
15	0,032	0,045	0,047	0,034	0,053
20	0,032	0,046	0,047	0,035	0,051

Si se combinan las muestras de la primera etapa con un panel de alta densidad perforado y/o con otro material absorbente se obtienen los resultados mostrados en la Figura 14. Aumentando el espesor con otro absorbente se aumenta también su coeficiente de absorción, mientras que añadiendo el panel perforado se obtiene una absorción selectiva en determinadas frecuencias.

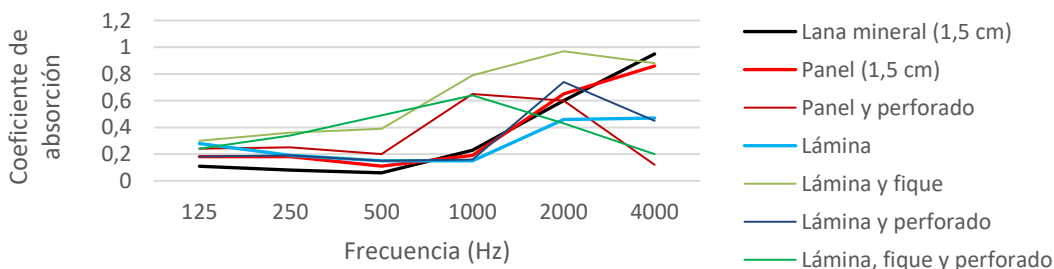


Figura 14 – Gráfica de coeficientes de absorción de la 1ª etapa para un rango de frecuencias.

La rigidez dinámica permite determinar la capacidad de la muestra frente a ruido de impacto. Como muestra la Tabla 3, las muestras podían actuar como capa amortiguadora en suelos flotantes por presentar valores de rigidez dinámica entre 10 y 30 MN/m<sup>3</sup> [14]. Se estimó la mejora  $\Delta L_w$  (dB) al índice global de reducción sonora a ruido de impactos para un suelo flotante tipo con 5 cm de losa de hormigón sobre el aislamiento [15]. Conforme al apartado 4.5.1. del Catálogo de elementos constructivos del CTE [16], los paneles mostraron mejor comportamiento frente a lanas minerales bajo el mismo análisis.

Tabla 3 – Comparación de índices de reducción sonora

Aislante	Espesor (cm)	Frecuencia de resonancia $f_0$ (Hz)	Rigidez dinámica $s'$ (MN/m <sup>3</sup> )	$\Delta L_w$ (dB)
Sándwich	1,5	63,75	32	26,8
Lana mineral	1,2	-	<20	25
	2,0	-	<13	30
	3,0	-	<9	33
	2,5	46,25	17	30,8

De forma similar se estudió su comportamiento frente a ruido aéreo en trasdosados siguiendo la norma UNE EN ISO 12354-1: 2018 y los apartados 4.4.1.1 y 4.4.1.3. del Catálogo de elementos constructivos del CTE [16]. La mejora al índice de reducción acústica  $\Delta R_w$  (dB) para una lana mineral de 3 cm en un trasdosado de yeso laminado de 1,5 cm con una capa de ladrillo hueco simple tiene valores inferiores a la decena; mientras que para el mismo caso el Sándwich reducía 14,8 dB y el Sándwich 2 añade 16,5 dB de reducción.

#### 4.4. Otras posibilidades

Por último, se desarrollan otras dos posibilidades que ofrece el material.

##### Muestra 5\_Huevera

Esta muestra se moldeó sobre un molde con cavidades semiesféricas para conseguir un difusor. Para ello se aglomeraron las fibras con adhesivo y agua. El procedimiento se ilustra en la Figura 15 y el resultado en las fotos de las Figuras 16 y 17.



Figura 15 – Diagrama de fabricación de la Muestra 5\_Huevera.



Figura 16 – Mezcla, moldeado y Muestra 5\_Huevera.



Figura 17 – Espesor de Muestra 5\_Huevera.

La disolución consiguió una muestra liviana y porosa. Sin embargo, el adhesivo, al secarse más rápido que el agua generó una fina capa superficial dificultando la evaporación del agua. El aumento del tiempo de secado, unido a las cavidades del molde dio lugar a la aparición de moho; como se aprecia en las fotos de la Figura 18.



Figura 18 – Porosidad por la cara de atrás y moho en la Muestra 5\_Huevera.

En este caso, la pistola de impedancia se utilizó en el método “Scan and Paint” que permite registrar de manera continua el coeficiente de absorción sobre la superficie del material. Los valores registrados del orden de 0,9 a altas frecuencias determinaron que podía funcionar como difusor como se muestra en la Figura 19.

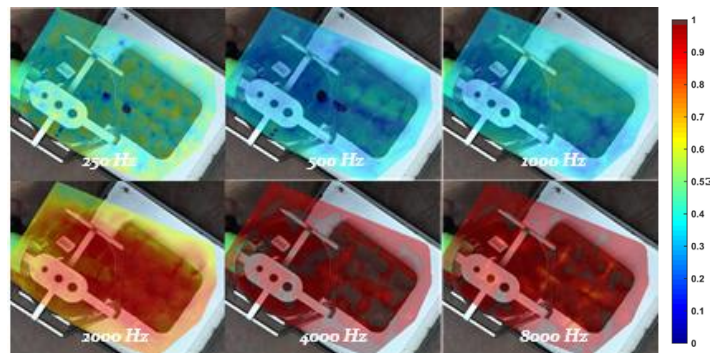


Figura 19 – Mapeado de coeficientes de absorción de la Muestra 5\_Huevera por la cara superior en un intervalo de frecuencias.

### Muestra 6\_Sándwich 3

Esta tercera versión del sándwich incorporó colorante alimentario E-132 por inmersión. Además, se alteró la superficie para darle otro acabado (ver Figura 21 para el procedimiento de fabricación y fotos de las Figuras 22 y 23 para la muestra final resultante).



Figura 20 – Fibra de madera teñida.

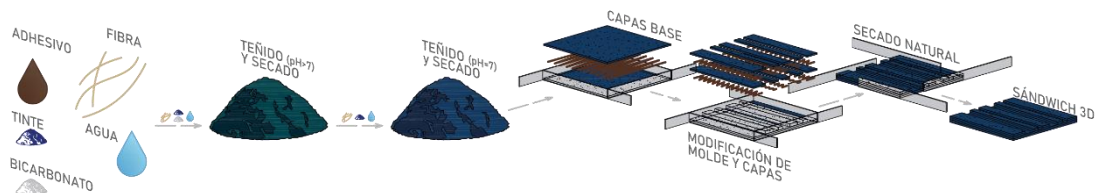


Figura 21 – Diagrama de fabricación de la Muestra 6\_Sándwich 3.

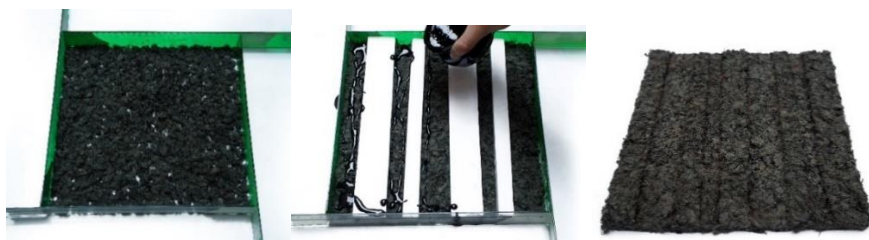


Figura 22 – Capa de fibra teñida, moldeado y Muestra 6\_Sándwich 3.





Figura 23 – Espesor de Muestra 6\_Sándwich 3.

Como anteriormente, se midió el coeficiente de absorción del panel y su combinación con el Sándwich 2, dando los mejores resultados, tal y como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4 – Valores de coeficiente de absorción frecuencia (Hz)/muestra

Frecuencia (Hz)	Coeficientes de absorción $\alpha$			
	Sándwich (1,5 cm)	Sándwich 2 (2,5 cm)	Sándwich 3 ( $\approx$ 1,5 cm)	Sándwich 2+3 ( $\approx$ 4 cm)
125	0,14	0,13	0,15	0,22
250	0,13	0,13	0,20	0,19
500	0,09	0,17	0,15	0,39
1000	0,13	0,62	0,40	0,76
2000	0,38	0,83	0,71	0,81
4000	0,89	0,97	0,58	0,78

## 5. APLICACIONES

Conforme a los resultados obtenidos en los ensayos de absorción y rigidez dinámica los paneles Sándwich y Sándwich 2 pueden ser sustitutos de lanas minerales y otros aislantes comunes; así como emplearse en trasdosados y en suelos flotantes. Respecto a los valores de conductividad térmica, son buenos aislantes que podrían emplearse en cerramientos de cubierta y fachada, protegidos de la humedad. El sistema de fabricación permite modificar el espesor y las dimensiones y formas del panel fácilmente. En espacios interiores los 3 paneles sándwich suponen una alternativa para techos o cuadros acústicos e incluso pueden combinarse entre sí o con otros materiales, pudiendo jugar con el acabado final variando colores y patrones personalizándolos para cada proyecto.

## 6. CONCLUSIONES

- Según forma y composición:

El adhesivo de lignina es equiparable a otros pegamentos comunes.

La fibra de madera es fácilmente moldeable y manipulable y absorbe tratamientos como el teñido.

El colorante empleado es demasiado débil e inestable por lo que se recomienda explorar otros que consigan mayor intensidad de color.

El uso de agua con un tiempo de secado lento favorece la aparición de agentes biológicos que puede evitarse con una buena ventilación, un ambiente controlado o la aplicación de tratamientos por inmersión o rociado.

El traslado a una fabricación industrial proporcionará mejores acabados y mayor control sobre el producto pudiendo aportar diferentes resultados de rigidez, densidad y flexibilidad en los paneles.

-Según propiedades acústicas

El coeficiente de absorción a frecuencias intermedias y altas se incrementa con el espesor de la muestra.

El aumento del espesor se traduce en un mayor valor de rigidez dinámica, incrementándose con este el índice de mejora acústica en aislamiento a ruido aéreo y de impactos.

Las muestras 2, 3 y 4 son aislantes térmicos, por su conductividad térmica, comparables a lanas minerales de igual espesor. Además, los valores aumentan con la densidad y el espesor.

## REFERENCIAS

- [1] Objetivo 11: Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles. Naciones Unidas [en línea]. Objetivos de desarrollo sostenible, [consulta: 18 julio 2022]. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/>
- [2] Circular material use rate in Europe. European Environment Agency [en línea]. 2022 [consulta: 18 julio 2022]. Disponible en: <https://www.eea.europa.eu/ims/circular-material-use-rate-in-europe>.
- [3] Stahel, W. R. *The Circular Economy: A User's Guide*, Routledge, Londres, 2019.
- [4] Noise. European Environment Agency [en línea]. [consulta: 14 agosto 2022]. Disponible en: <https://www.eea.europa.eu/themes/human/noise/noise-2>.
- [5] Raworth, K. *Doughnut Economics: Seven Ways to Think Like a 21st Century Economist*, Chelsea Green Publishing, Vermont, 2017.
- [6] Betanzos HB [en línea]. [consulta: 18 marzo 2022]. Disponible en: <https://www.betanzoshb.es/>
- [7] Beyer, H. y Walter, W. *Manual de química orgánica*, Reverté, S. A., Barcelona, 1987.
- [8] Giménez, A. M.; Moglia, J. G.; Hernández, P. y Gerez, R. Anatomía de madera. Argentina: Universidad Nacional de Santiago del Estero, 2000.
- [9] Barotto, A. J.; Fernández, M. E. y Monteoliva, S. Anatomía y densidad de la madera en Eucalyptus: variación interespecífica e implicancia en la resistencia al estrés abiótico. *Revista de la Facultad de Agronomía*, vol. 114, n. 2, 2015, pp. 209-217.
- [10] Boerjan, W.; Ralph, J. y Baucher, M. Lignin Biosynthesis. *Annual Review of Plant Biology*, vol. 54, n. 1, 2003, pp. 519-546.
- [11] Pedrero, A.; Navacerrada, M.Á.; de la Prida, D.; Iglesias, L. y D.-C. A. On the Accuracy of the Sound Absorption Measurement with an Impedance Gun. *Applied Acoustics*, vol. 158, 2020.
- [12] Netzsch, G. *Heat Flow Meter – HFM 436 Lambda Thermal Conductivity: A Key Parameter for Improved Energy Efficiency*, Alemania: Catálogo Grupo Netzsch, 2012.
- [13] UNE EN 29052-1:1994: *Determinación de la rigidez dinámica. Parte 1: Materiales utilizados bajo suelos flotantes en viviendas*.
- [14] Sesmero Irala, A. Las fibras naturales: una opción sostenible para la construcción, 2019. [En línea]. Available: <https://oa.upm.es/55896/>.
- [15] Carrión Isbert, A. *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*, Ediciones UPC, Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya, 1998.
- [16] CTE DB-HR. *Catálogo de elementos constructivos*, 2010.