



TESIS DOCTORAL

DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN DE BIO-AISLANTES TÉRMICOS Y ACÚSTICOS
A PARTIR DE BIOMASAS RESIDUALES ABUNDANTES EN EXTREMADURA

ALBA CHAVES ZAPATA

MODELIZACIÓN Y EXPERIMENTACIÓN EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Conformidad del director/a y codirector/a en su caso (Deben constar nombres y apellidos)

Fdo.: Mara Olivares Marín

Fdo.: Silvia Román Suero

Fdo.: Remedios Hernández Linares

Esta tesis cuenta con la autorización del director/a y codirector/a de la misma y de la Comisión Académica del programa. Dichas autorizaciones constan en el Servicio de la Escuela Internacional de Doctorado de la Universidad de Extremadura.



TESIS DOCTORAL

**DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN DE BIO-AISLANTES TÉRMICOS Y ACÚSTICOS
A PARTIR DE BIOMASAS RESIDUALES ABUNDANTES EN EXTREMADURA**

ALBA CHAVES ZAPATA

MODELIZACIÓN Y EXPERIMENTACIÓN EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

2023

AGRADECIMIENTOS

Con gratitud y emoción, deseo expresar mis más sinceros agradecimientos a quienes han desempeñado un papel fundamental en la realización de esta tesis doctoral. En primer lugar, a mis tutoras, Mara Olivares Marín, Silvia Román Suero y Remedios Hernández Linares, cuyas orientaciones, consejos y apoyo constante me han guiado a lo largo de este arduo trayecto académico. Sin ellas este logro no habría sido posible. Mi más sincero agradecimiento.

Asimismo, mi gratitud se extiende a la Fundación Tatiana Pérez de Guzmán El Bueno, cuya generosa beca predoctoral de 4 años ha hecho posible el desarrollo de este trabajo. Su respaldo ha sido esencial para llevar a cabo esta investigación.

Deseo expresar mi gratitud a todas las personas que han contribuido de diversas formas en esta tesis. Valentín Gómez Escobar y Celia Moreno González, su aporte y disposición han sido de gran relevancia. Beatriz Ledesma, su simpatía, destreza y apoyo incondicional han sido invaluable. A Ana Estibaliz Sánchez González, le agradezco sinceramente su colaboración que ha sido de gran ayuda en este proyecto. A los colaboradores Aurora, Gloria y Manu, quienes han sido un gran apoyo en una parte significativa de este trabajo. A todas y cada una de las personas que se han cruzado por mi camino durante esta travesía y han enriquecido mi vida tanto intelectual como emocionalmente, les expreso mi gratitud más sincera.

En lo personal, a mi familia, que merece un reconocimiento especial por su apoyo y su constante estímulo a lo largo de mi camino para conseguir todo aquello que me proponga.

También, debo agradecer profundamente a mi esposo, Sergio, por ser un pilar fundamental en todos los proyectos en los que me embarco. Gracias por estar a mi lado en los momentos de alegría y en los desafiantes. Eres mi compañero de vida y mi más sólido apoyo.

Para concluir, dedico esta tesis doctoral a mi querido hijo, Hugo, quien llegó a mi vida en medio de este proyecto. Cada día, él me brinda la fortaleza y el estímulo necesarios para continuar avanzando. Gracias por ser el regalo más valioso que la vida me ha otorgado.

Resumen de la Tesis

El *Gran Pacto Verde* a nivel internacional representa un esfuerzo global para abordar los desafíos medioambientales y promover la sostenibilidad. Este pacto se centra en promover la economía circular, que busca maximizar la utilización de recursos y minimizar los residuos. En este contexto, se ha prestado una atención creciente al aprovechamiento de materiales residuales, como las biomásas, que provienen de diversas actividades. El propósito de esta Tesis Doctoral es contribuir al desarrollo de bioaislantes basados en biomásas abundantes en la naturaleza. Para alcanzar este objetivo, primero se realizó una revisión sistemática de la literatura sobre el empleo de biomásas de origen vegetal en construcción y posteriormente se analizaron las propiedades de una biomasa invasora muy abundante en los cauces de los ríos de diversas áreas del mundo (incluyendo el río Guadiana, en Extremadura): el jacinto de agua, o camalote. Específicamente se analizó el potencial del camalote para ser empleado, por sí solo o combinado con otros materiales, en la producción de materiales que exhiban aceptables propiedades térmicas y acústicas. Como resultado de estas investigaciones, esta memoria de tesis doctoral enriquece la literatura al ampliar la comprensión de las propiedades de esta biomasa como potencial material de construcción sostenible y eficiente desde el punto de vista energético. Este enfoque contribuye al impulso de prácticas más ecológicas y alineadas con los objetivos de sostenibilidad global.

Palabras clave: biomásas, jacinto de agua, propiedades térmicas y acústicas.

Abstract

The *European Green Deal* represents a global effort to address environmental challenges and promote sustainability. This deal focuses on the circular economy, which aims to maximize resource utilization and minimize waste. In this context, there has been a growing interest in harnessing residual materials, such as biomasses, derived from various activities. The purpose of this doctoral thesis is to contribute to the development of bio-insulation materials based on abundant biomasses in nature. To achieve this goal, a systematic literature review was conducted regarding the use of plant-derived biomasses in construction. Subsequently, the properties of an invasive biomass found in abundance in riverbeds in various parts of the world, including the Guadiana River in Extremadura, known as water hyacinth, were analysed. Specifically, the potential of water hyacinth to be used either alone or in combination with other materials in the production of materials exhibiting favourable thermal and acoustic properties was assessed. As a result of these investigations, this doctoral dissertation enriches the literature by expanding the understanding of the properties of this biomass to be used as a sustainable and energy-efficient construction material. This approach contributes to the promotion of more ecologically-aligned practices in line with global sustainability goals.

Keywords: biomass, water hyacinth, thermal and acoustic properties

ÍNDICE GENERAL

<u>CAPÍTULO 1</u>	13
REFERENCIAS	18
<u>CAPÍTULO 2</u>	20
2.1. INTRODUCCIÓN	25
2.2. METODOLOGÍA	28
2.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	32
2.3.1. EVOLUCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	32
2.3.2. BIOMASAS ESTUDIADAS	33
2.3.3. SUSTANCIAS DE UNIÓN.....	38
2.3.4. FORMATOS DE PRESENTACIÓN DEL MATERIAL ESTUDIADO	42
2.3.5. MÉTODOS DE PREPARACIÓN DE MUESTRAS.....	44
2.3.6. PROPIEDADES ESTUDIADAS.....	46
2.4. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	54
2.5. CONCLUSIONES	56
REFERENCIAS	57
<u>CAPÍTULO 3</u>	108
3.1. INTRODUCCIÓN	111
3.2. MATERIALES.....	113
3.2.1 TALLO DE JACINTO DE AGUA (EICHHORNIA CRASSIPES).....	113
3.2.2 OTROS MATERIALES.....	114
3.3. PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES	117
3.3.1 DISEÑO Y DESARROLLO DE LOS MOLDES	117
3.3.2 PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS.....	122
3.4. TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN.....	125
3.4.1 ANÁLISIS DE LA MATERIA PRIMA.....	125

3.4.2 ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO DE LAS MUESTRAS	126
3.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	130
3.5.1 ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO DE LA MATERIA PRIMA.....	130
3.5.2 ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS	133
3.6. SIMULACIÓN DE EFICIENCIA ENERGÉTICA	139
3.7. CONCLUSIONES	142
REFERENCIAS	143
<u>CAPÍTULO 4</u>	150
4.1. INTRODUCCIÓN	153
4.2. FUNDAMENTO TEÓRICO.....	158
4.2.1. EL AISLAMIENTO TÉRMICO	158
4.2.2. MÉTODO DEL ESTADO TRANSITORIO.....	163
4.3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	165
4.3.1. MATERIALES	165
4.3.2. TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN	167
4.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	168
4.4.1. MUESTRAS PREPARADAS ÚNICAMENTE CON WHS	168
4.4.2. MUESTRAS A BASE DE YESO	172
4.4.3. MUESTRAS A BASE DE OTROS MATERIALES CONSTRUCTIVOS.....	177
4.6. CONCLUSIONES	182
REFERENCIAS	184
<u>CAPÍTULO 5</u>	190
5.1. INTRODUCCIÓN	193
5.2. FUNDAMENTO TEÓRICO.....	199
5.2.1 ABSORCIÓN DEL SONIDO.....	199
5.2.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES ABSORBENTES SONOROS	204
5.2.3 MEDIDA DE LA ABSORCIÓN ACÚSTICA CON EL MÉTODO TUBO DE IMPEDANCIA	207

5.3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	212
5.3.1. MATERIALES	212
5.3.2. INSTRUMENTACIÓN DE MEDIDA.....	214
5.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	217
5.4.1. MUESTRAS PREPARADAS ÚNICAMENTE CON WHS	217
5.4.2. MATERIALES A BASE DE WHS MEZCLADO CON YESO.....	227
5.4.3. MATERIALES A BASE DE WHS COMBINADO CON OTROS MATERIALES CONSTRUCTIVOS.....	237
5.5 CONCLUSIONES	241
REFERENCIAS	243
<u>CAPÍTULO 6</u>	252
ANEXOS	256





CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

La comunidad científica se enfrenta hoy a grandes retos, entre los cuales se encuentra el diseño de sistemas sostenibles de gestión de la energía, que abarca los procesos que producen y distribuyen recursos energéticos, así como el diseño de materiales y configuraciones menos demandantes de energía. Este es el motivo de la creciente inversión en materiales que mejoren la resistencia a la transmisión de calor de la envolvente de los edificios.

La intensificación de las investigaciones sobre métodos que permitan la gestión eficiente de residuos, y su posible conversión en sustancias de valor añadido genera además otras ventajas, como el desarrollo de zonas rurales. En la presente tesis doctoral se aborda el estudio del potencial de un residuo cuya gestión es estratégica en para la Comunidad Autónoma de Extremadura (España) y otras áreas del mundo: la *eichhornia crassipes* o jacinto de agua (WH, *water hyacinth*). Específicamente se investiga la producción de materiales elaborados a partir de esta bioamasas y se analizan sus propiedades de aislamiento térmico o acústico, para su posible uso en construcción.

El estudio que se presenta ha sido realizado a lo largo de cuatro años, en el seno de los Departamentos de Ingeniería Mecánica, Energética y de los Materiales, el de Física Aplicada y el de Economía Financiera y Contabilidad, en las dependencias del Centro Universitario de Mérida y la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Extremadura. Al amparo de una beca otorgada por la “Fundación Tatiana Pérez de Guzmán el Bueno”, la doctoranda ha compaginado la lectura de todos los artículos identificados sobre las propiedades térmicas y acústicas de los residuos biomásicos de origen vegetal para la realización de una revisión sistemática actualizada, con la puesta a punto de métodos de obtención de materiales (muestras) basados en biomasa, la caracterización de los materiales en cuanto a las propiedades de estudio, y la producción científica de material de difusión.

La *eichhornia crassipes*, también conocida como jacinto de agua o camalote, es una planta acuática originaria de Sudamérica. Catalogada en España como especie exótica invasora, su expansión resulta preocupante tanto para las autoridades españolas como para las autoridades internacionales. Actualmente se están explorando los principales potenciales del WH como recurso para producir materiales de valor añadido debido a su alta tasa de crecimiento, a su capacidad para constituirse en fuente potencial de fitoquímicos o a la porosidad de su tallo (Boonpoke, 2015; Ilo et al., 2020; Román et al., 2020; Taqi et al., 2019; Zimmels et al., 2006).

Aunque hay estudios que demuestran la capacidad de aislamiento térmico del WH (Jaktorn y Jiajitsawat, 2014; Salas-Ruiz et al., 2019; Sharma et al., 2021), la investigación sobre su rendimiento acústico es limitada. En general, faltan investigaciones que realicen estudios de forma sistemática y comparativa entre ambas

propiedades. Por lo tanto, es necesario seguir investigando en este campo para comprender mejor el potencial del WH como aislante térmico y absorbente acústico en la construcción. Así, este estudio de investigación pretende preparar materiales basados en WH y evaluar su comportamiento térmico y acústico para su uso potencial en el sector de la construcción.

El objetivo general de la presente tesis doctoral es *preparar y caracterizar materiales a base de tallo de jacinto de agua para su potencial aplicación como aislante térmico y material fonoabsorbente*. Para alcanzar este objetivo general se establecen los siguientes objetivos específicos:

- a) Realizar una revisión sistemática de la literatura sobre las propiedades térmicas y acústicas de materiales biomásicos de origen vegetal para sintetizar el conocimiento existente, identificar lagunas en la investigación y proponer una agenda de investigación futura.
- b) Desarrollar y caracterizar materiales basados en jacinto de agua y evaluar sus propiedades físicas, mecánicas, térmicas y acústicas que indiquen su posible aplicación como materiales aislantes térmicos y acústicos en la industria de la construcción.
- c) Evaluar la viabilidad y desempeño de los paneles desarrollados en la construcción de paredes y muros para una vivienda.

Para acometer los objetivos planteados, la presente tesis doctoral se ha organizado alrededor de **seis capítulos**:

- **Capítulo 1. Introducción.** En este capítulo se plantea la motivación del trabajo junto con sus objetivos generales y parciales.
- **Capítulo 2. Revisión de literatura sistemática.** En este capítulo se realiza una revisión sistemática de la literatura sobre las propiedades térmicas y acústicas de materiales a base de biomasa de origen vegetal para su uso en construcción. En concreto se revisan 354 artículos identificados a partir de la base de datos de *Web of Science* (WOS) y publicados entre 1930 y octubre de 2021.
- **Capítulo 3. Estudio físico-químico de los materiales y procedimientos experimentales.** En este capítulo se describen los materiales y métodos experimentales utilizados en el desarrollo de esta investigación: preparación de la materia prima (WH), desarrollo del material empleado en la fabricación de las probetas, métodos de caracterización, algunos resultados de caracterización físico-química, y planteamiento de supuestos para simulación.
- **Capítulo 4. Estudio del comportamiento térmico.** En este capítulo se estudia la conductividad térmica de las muestras de materiales preparadas a base de WH,

en diferentes condiciones experimentales (tamaño de partícula, proporción en mezcla, carga aplicada y tipo de aglutinante).

- **Capítulo 5. Estudio del comportamiento acústico.** En este capítulo se analizan las características acústicas de una serie de muestras preparadas a base de WHS con la finalidad de comprender su comportamiento y optimizar su posible aplicación como absorbente acústico. Para la preparación de las muestras se han tenido en cuenta variables tales como su espesor, la cantidad de WHS en la muestra, el tamaño de partícula del WHS o el tipo de aglutinante.
- **Capítulo 6. Conclusiones de la tesis.** En este capítulo se presentan las conclusiones más relevantes obtenidas durante esta investigación, así como las futuras áreas de estudio que se derivan de los resultados alcanzados.

Finalmente, los resultados mostrados en la tesis han sido parcialmente utilizados en la preparación de material científico. Hasta ahora se ha publicado el siguiente artículo:

- Olivares-Marín, M., Román-Suero, S., Gómez-Escobar, V., Moreno-González, C., Chaves-Zapata, A., y Ledesma-Cano, B. (2023). Thermal performance and sound absorption capability of water hyacinth stems-based materials. *Journal of Cleaner Production*, 425, 138903. (Q1, Journal Citation Report).

En el momento de cierre de la memoria de esta tesis doctoral se está preparando el siguiente manuscrito (que pretende ser enviado a la revista *Construction and Building Materials*, Q1, Journal Citation Report):

- Olivares-Marín, M., Román-Suero, S., Gómez-Escobar, V., Moreno-González, C., Chaves-Zapata, A., y Sanchez-González, E. Thermal insulation and sound absorption characterization of bio-composites based on gypsum and water hyacinth stem particles.

Por otro lado, se han presentado un total de 9 comunicaciones a congreso. De ellas, las siguientes 2 se han presentado como comunicaciones orales:

- Chaves-Zapata, A., Olivares-Marín, M., Sánchez-González, E., y Román-Suero, S. (16-18 de noviembre del 2022). Propiedades mecánicas de materiales compuestos basados en yeso y jacinto de agua. *Encuentro Iberoamericano en Biomasa y Bioenergía, Bioeconomía Sustentable y Circular Rumbo al Desarrollo Sostenible*, Querétaro, México (comunicación oral realizada de forma virtual).
- Chaves-Zapata, A. (5-8 de diciembre de 2019). Biomásas como material aislante térmico y acústico. *35^o Encuentro de Jóvenes Investigadores*, Salamanca, España (comunicación oral realizada de forma presencial).

Y las 7 comunicaciones restantes han sido presentadas en formato póster, tal y como se describe con detalle a continuación:

- Chaves-Zapata, A., Hernández-Linares, R., Olivares-Marín, M., y Román-Suero, S. (26-27 de septiembre de 2019). Biomásas con propiedades térmicas y acústicas para paneles de aislamiento *eco-friendly*: una revisión de la literatura. *II Jornadas de Jóvenes investigadores INNOVA-Salamanca*, Salamanca, España (comunicación presencial).
- Chaves-Zapata, A., Olivares-Marín, M., Hernández-Linares, R., y Román-Suero, S. (29 de noviembre de 2019). Adecuación de biomásas como material de construcción para aislamiento térmico y acústico. *III Jornadas Doctorales de la Universidad de Extremadura*, Badajoz, España (comunicación presencial).
- Chaves-Zapata, A., Ledesma-Cano, B., Román-Suero, S., Moreno-González, C., Gómez-Escobar, V., y Olivares-Marín, M. (29 de octubre de 2022). *Preparación y evaluación del aislamiento térmico y la absorción acústica de yeso reforzado con tallo de camalote*. *III Jornada de Investigación Universitaria sobre Cambio Climático-Cambio Climático y Energía Sostenible*, Valencia, España (comunicación virtual).
- Chaves-Zapata, A., Olivares-Marín, M., Hernández-Linares, R., y Román-Suero, S. (27 de noviembre de 2020). Preparación y evaluación de materiales híbridos reforzados con tallo de camalote. *IV Jornadas Doctorales de la Universidad de Extremadura*, Extremadura, España (comunicación virtual).
- Chaves-Zapata, A., Olivares-Marín, M., Ledesma-Cano, B., y Román-Suero, S. (9-11 de marzo de 2021). HTC as promising route for enhancing thermal insulation in bioarchitecture. *Congreso Green Carbon 2020 (International Symposium on Functional Biomass-derived Carbon Materials)*, Zaragoza, España (comunicación virtual).
- Chaves-Zapata, A., Román-Suero, R., Olivares-Marín, M., y Hernández-Linares, R. (24-25 de enero de 2022). Economic and sustainability analysis on the use of biomaterial for building applications. *VI International Forum on Management*, Mérida (Badajoz), España (comunicación virtual).
- Chaves-Zapata, A., Olivares-Marín, M., Hernández-Linares, R., y Román-Suero, S. (5 de noviembre de 2021). Simulación del comportamiento térmico de materiales compuestos yeso/biomasa en bioarquitectura: Caso de estudio para una vivienda unifamiliar. *V Jornadas Doctorales de la Universidad de Extremadura*, Badajoz, España (comunicación virtual).

Durante el desarrollo de la investigación, la doctoranda ha impartido docencia práctica en el Departamento de Ingeniería Mecánica y de los Materiales mediante “*Venia Docenti*”, y ha participado como ponente en los siguientes seminarios del Ciclo de Seminarios de Doctorandos:

- Adecuación y caracterización del “camalote” o “jacinto de agua” para su uso en aislamiento térmico y acústico, Badajoz, 10 de septiembre de 2020.
- Biomásas con propiedades de aislamiento térmico y absorción acústica, Badajoz, 7 de septiembre de 2021
- Preparación y caracterización de materiales compuestos basados en biomasa para su posible uso en construcción, Badajoz, 6 de septiembre de 2022.
- Biomateriales con propiedades de aislamiento térmico y absorción acústica, Badajoz, 14 de septiembre 2023.

REFERENCIAS

- Boonpoke, A. (2015). Study on preparation of water hyacinth-based activated carbon for pulp and paper mill wastewater treatment. *Journal of Environmental Biology*, 36(5), 1143-1148. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26521558>
- Ilo, O. P., Simatele, M. D., Nkomo, S. L., Mkhize, N. M., y Prabhu, N. G. (2020). The benefits of water hyacinth (*eichhornia crassipes*) for southern africa: A review. *Sustainability*, 12(21), 9222. <https://doi.org/10.3390/su12219222>
- Jaktorn, C., y Jiajitsawat, S. (2014). Production of thermal insulator from water hyacinth fiber and natural rubber latex. *International Journal of Science*, 11(2), 31-41.
- Román, S., Ledesma, B., Álvarez, A., Coronella, C., y Qaramaleki, S. V. (2020). Suitability of hydrothermal carbonization to convert water hyacinth to added-value products. *Renewable Energy*, 146, 1649-1658. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.157>
- Salas-Ruiz, A., del Mar Barbero-Barrera, M., y Ruiz-Téllez, T. (2019). Microstructural and thermo-physical characterization of a water hyacinth petiole for thermal insulation particle board manufacture. *Materials*, 12(4), 560. <https://doi.org/10.3390/ma12040560>
- Sharma, A., Singh, P. K., y Sharma, V. K. (2021). Analysis on WH cement composite thermal insulation material for increasing efficiency of building. *Materials Today: Proceedings*, 45, 3036-3041. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.056>
- Taqi, Z. J., Hamad Mohammed, A., y Jabir, M. S. (2019). Biomedical applications of *eichhornia crassipes*. *Research Journal of Biotechnology*, 14, 156-159.

Zimmels, Y., Kirzhner, F., y Malkovskaja, A. (2006). Application of *Eichhornia crassipes* and *Pistia stratiotes* for treatment of urban sewage in Israel. *Journal of environmental management*, 81(4), 420-428. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.11.014>



CAPÍTULO 2

REVISIÓN SISTEMÁTICA DE LA LITERATURA SOBRE BIOMASAS CON PROPIEDADES AISLANTES

Resumen

En este capítulo realiza una revisión sistemática de la literatura sobre las propiedades térmicas y acústicas de materiales a base de biomasa de origen vegetal para su uso en construcción, incluyendo fibras o partículas de biomásas en su estado natural, presentadas en distintas formas (relleno, muestra, panel, material compuesto, etc.). Se han revisado 354 artículos identificados a partir de la base de datos de *Web of Science* (WOS) y publicados entre 1930 y 2021. Los resultados indican que, de los artículos revisados, 172 investigan las propiedades térmicas, 105 las propiedades acústicas y 77 tanto las propiedades térmicas como acústicas. Entre las biomásas más estudiadas se encuentran la madera, el cáñamo, el lino, maíz y el corcho, mientras que otras como el jacinto de agua, la avena y el centeno han sido investigadas sólo de manera puntual. Entre los aglutinantes más usados para combinar los materiales biomásicos, destacan la resina urea-formaldehído, el alcohol polivinílico, el ácido poliláctico y el almidón de maíz, aunque también se han estudiado otros aglutinantes sostenibles no fósiles, como el vidrio líquido, la goma arábiga y el quitosán. En término de propiedades, se lograron valores muy bajos de conductividad térmica (0,06 W/mK) utilizando cáñamo como refuerzo en materiales a base de cemento. También se obtuvieron valores de absorción acústica similares a materiales comerciales (e.g., lana de vidrio) para biomásas como las fibras de yute y cáñamo. Esta revisión sistemática de la literatura amplía nuestro conocimiento sobre las propiedades térmicas y acústicas de distintas biomásas de origen vegetal empleadas en la construcción, y contribuye a la literatura proponiendo una agenda de investigación futura.

CONTENIDO

2.1. INTRODUCCIÓN	23
2.2. METODOLOGÍA	26
2.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	30
2.3.1. Evolución de la investigación.....	30
2.3.2. Biomosas estudiadas.....	31
2.3.3. Sustancias de unión	36
2.3.4. Formatos de presentación del material estudiado	40
2.3.5. Métodos de preparación de muestras	42
2.3.6. Propiedades estudiadas	44
2.4. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	52
2.5. CONCLUSIONES	54
REFERENCIAS	55

2.1. INTRODUCCIÓN

El momento de transición energética y la crisis de recursos que se vive en el Planeta han motivado la búsqueda de nuevos materiales cuya extracción y procesamiento sea más sostenibles que los métodos tradicionales (Asdrubali et al., 2015; Liuzzi et al., 2017; Wang et al., 2018). Así, aunque la biomasa ha sido utilizada en la construcción desde tiempos prehistóricos, recientemente se ha observado un impulso en la investigación y desarrollo de procesos que utilizan biomasa en la fabricación de materiales arquitectónicos, más allá de la madera (Giannotas et al., 2021; Lee et al., 2022; Rabbat et al., 2022).

Según He y col. (2023, p. 161), “la biomasa se refiere a un organismo en el cual los animales, las plantas y los microorganismos convierten la energía solar en energía almacenada en el cuerpo a través de la fotosíntesis directa o el uso indirecto de ella”. La biomasa puede convertir la energía solar almacenada en sustancias sólidas, líquidas, gaseosas y otras mediante el ciclo de carbono renovable (Wang, 2016). En esencia, es otra forma de energía solar. Por lo tanto, en un sentido amplio, todas las sustancias orgánicas vivas o que hayan vivido pueden denominarse biomasa. De hecho, la Real Academia Española (RAE) define la biomasa como “aquella materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía” (RAE, 2023, acepción 2). Esta materia orgánica puede proceder de cualquier residuo agroindustrial, urbano, forestal o de desechos de seres vivos (Kalyani y Anitha, 2013). Así, en el contexto de esta tesis, el término “biomasa” se refiere específicamente a los residuos biomásicos y no a la biomasa con otros fines específicos (carpintería, construcción o artesanía), cuya recolección se realiza con el propósito de las citadas aplicaciones. Es importante considerar que la biomasa residual comprende todos aquellos subproductos de plantas o animales que resultan de actividades previas (incluyendo podas o limpiezas de ecosistemas) y que no son adecuados para su uso como alimento (Ilham, 2021).

Los recursos biomásicos han adquirido una importancia creciente (e.g., Laborel-Préneron et al., 2018; Rabbat et al., 2022) porque son susceptibles de ser transformados en bioenergía o bioproductos (Ilham, 2021). Así, por ejemplo, son aptos para su uso como combustible, con o sin tratar, como alternativa a los combustibles fósiles, al poder caracterizarse como recurso de emisión de CO₂ nula (el CO₂ emitido durante la combustión es el que la planta fijó durante su fotosíntesis) (Ilham, 2021). Además, los residuos biomásicos, tanto mezclados como individuales, han demostrado tener un potencial considerable en la mejora de las propiedades térmicas y acústicas en arquitectura desde hace décadas. La primera referencia de la que se tiene constancia en este ámbito data de 1930, cuando Gibson propuso la fabricación de ladrillos con residuos

de paja para mejorar sus propiedades aislantes térmicas, basándose en que su baja densidad y porosidad contribuyen a reducir la conductividad térmica y a mejorar la absorción acústica (Rabbat et al., 2022). Sin embargo, otras razones parecen haber contribuido también al interés por el tema objeto de estudio. Una de estas razones es la creciente normativa relacionada con la lucha contra el cambio climático, la cual ha desempeñado un papel fundamental al generar conciencia y promover una cultura en torno a estas cuestiones (Arora, 2018).

En el marco de la 16ª reunión de la Conferencia de las Partes de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP 16¹), celebrada en Cancún en diciembre de 2010, se actualizaron los objetivos para avanzar en la transición hacia la descarbonización y se generaron propuestas más acordes para los países en desarrollo (United Nations, 2010). Además, se establecieron los objetivos a alcanzar en 2030. Entre estos objetivos se incluyen: incrementar la cuota de renovables hasta un 27%; reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 40% con respecto a 1990; e incrementar la eficiencia energética en un 30% respecto a ese mismo año (United Nations, 2010). Un hito significativo en esta dirección fue la adopción del Acuerdo de París en 2015 (COP 21²), el cual buscaba abordar el cambio climático y limitar el incremento de la temperatura global por debajo de los 2 °C (United Nations, 2016). Este acuerdo ha impulsado políticas más estrictas en diversos sectores, incluida la construcción, lo que ha generado un aumento en la investigación y desarrollo de materiales de construcción sostenibles que contribuyan a la reducción de las emisiones (United Nations, 2016).

El Gran Pacto Verde Europeo (Comisión Europea, 2019), surgido en el contexto de la COP 16 y posteriores, reafirmó el compromiso de los países de la Unión Europea con la inversión en la renovación y eficiencia energética de edificios, el desarrollo de productos más duraderos y la promoción de una industria competitiva y resiliente a escala mundial, con una reducción significativa de las emisiones de CO₂.

Por otro lado, los avances en tecnología de conversión de biomasa han desempeñado un papel crucial en el aumento de la producción científica en este campo. Durante los años 2018 y 2019, se desarrollaron y optimizaron procesos de pirolisis y gasificación que mejoraron la eficiencia y la viabilidad económica de utilizar biomásas en la fabricación de materiales de construcción (Huang et al., 2019). Asimismo, se

¹ La COP 16 es la 16ª edición de la Conferencia de las Partes de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Se entiende por “partes” aquellos Estados nacionales que firmaron y ratificaron esos dos tratados internacionales, obligándose a observar y cumplir su contenido en materia de cooperación internacional en contra del cambio climático.

² LA COP 21 es la 21ª edición de la Conferencia de las Partes de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Fue organizada por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). En ella se alcanzó el renombrado Acuerdo de París.

observó un incremento en la inversión en investigación y desarrollo de tecnologías sostenibles, con programas y fondos gubernamentales que respaldaron la investigación en materiales de construcción ecológicos y renovables derivados de la biomasa (Comisión Europea, 2019).

Además, en los últimos años se ha creado una mayor conciencia sobre la importancia de la economía circular (Rabbat et al., 2022; Ricciardi et al., 2020), definida como un modelo de producción y consumo que busca reducir los residuos al mínimo y mejorar la gestión de los recursos mediante la ampliación y el cierre de los ciclos de los materiales y productos (Murray et al., 2017). La utilización de biomásas en la fabricación de materiales de construcción se considera una forma de cerrar el ciclo de vida de los productos y reducir la dependencia de los recursos no renovables (Liu et al., 2017b; Zhao et al., 2022).

Todos los elementos anteriores combinados han creado un escenario propicio para la exploración y desarrollo de soluciones sostenibles en la industria de la construcción, allanando el camino hacia una transformación más ecológica y responsable. En este contexto parece necesario identificar, evaluar y sintetizar el conocimiento existente sobre las propiedades térmicas y acústicas de los materiales biomásicos. Atender esta necesidad es especialmente relevante porque una gran parte de las revisiones de literatura relacionadas con el uso de materiales basados en biomásas para su empleo en el aislamiento de edificios, se han centrado en características de aislamiento térmico (e.g., Asdrubali et al., 2015; Liu et al., 2017b; Raut et al., 2011; Wang et al., 2018) y muchas de ellas se centran en biomásas específicas como la paja (Aladejana et al., 2020; Cascone et al., 2019), el cáñamo (Ingrao et al., 2015; Sáez-Pérez et al., 2020), la fibra de dátil (Elseify et al., 2019), el racimo de frutos vacíos de palma aceitera (Ramlee et al., 2021), la fibra de bagazo de caña de azúcar (Devadiga et al., 2020; Ramlee et al., 2021), la fibra de kapok (Zheng et al., 2021), o la corteza de árbol (Giannotas et al., 2021), etc. Otros trabajos han revisado la aplicación de biomásas en materiales de construcción en áreas geográficas determinadas, como el área mediterránea (Liuzzi et al., 2017) o los países euro mediterráneos (Cintura et al., 2021), y varias revisiones se han centrado en las biomásas que han sido empleadas en el refuerzo de materiales específicos como el poliuretano (Kuranchie et al., 2021), el hormigón (Sáez-Pérez et al., 2020; Tie et al., 2020) o el asfalto (He et al., 2023).

En cuanto a revisiones sistemáticas de literatura que analicen el uso de biomásas como bio-agregados en materiales de construcción, Liu et al (2017a) revisaron 144 artículos (publicados entre 1974 y 2016) que analizaban las propiedades térmicas de aislantes hechos de biomásas agroindustriales, forestales, etc. Por su parte, Wang et al. (2018) revisaron 3536 documentos (publicados entre 1981 y 2017) que analizaban cómo los materiales usados en la fabricación de muros para mejorar su aislamiento térmico

impactaban en el consumo de energía y recursos. Recientemente, Ricciardi y col. (2020) han revisado 200 artículos (publicados entre 2009 y 2019) sobre reutilización de residuos biomásicos (coco, café, maíz, algodón y arroz) como aditivos para producir paneles de aislamiento térmico y acústico.

Aunque se han publicado diversos artículos de revisión, son pocos los realizados de forma sistemática (Barreca et al., 2017; Liu et al., 2017; Wang et al., 2018) y ninguno ha considerado tanto propiedades térmicas como acústicas. Por tanto, nuestro objetivo en este capítulo es llevar a cabo una revisión sistemática de literatura empírica sobre biomásas de origen vegetal no tratadas o modificadas utilizadas en la preparación de materiales de construcción, ya sea como relleno, aditivo, bio-agregado, o material en sí mismo, centrándose en el estudio de las propiedades térmicas y acústicas de los productos finales. En concreto, se buscará responder a las siguientes preguntas: (1) ¿Cuáles son los residuos de biomasa más investigados en la literatura sobre propiedades térmicas y acústicas en arquitectura?; (2) ¿Cuáles son las propiedades térmicas y acústicas de los recursos biomásicos investigados?; y (3) ¿Qué deberíamos saber para mejorar nuestro conocimiento sobre las propiedades acústicas y térmicas de los residuos de biomasa?. Para responder a estas preguntas, se lleva a cabo una revisión sistemática de la literatura, que es “una revisión de un cuerpo de literatura existente que sigue una metodología transparente y reproducible en la búsqueda, la evaluación de su calidad y la síntesis, con un alto nivel de objetividad” (Kraus et al., 2020). Específicamente, en este capítulo se analizan, entre otras cuestiones, la evolución histórica de las publicaciones, los tipos de biomásas investigadas, la presentación física de las muestras, los aglutinantes involucrados, los métodos de fabricación y las propiedades térmicas y acústicas de los productos obtenidos.

Con esta revisión sistemática se pretende contribuir a la literatura ampliando nuestro conocimiento sobre las propiedades térmicas y acústicas de distintas biomásas de origen vegetal empleadas en la construcción. El carácter sistemático de este estudio garantizará la objetividad y transparencia de los resultados. Además, al incluir en la revisión todos los tipos de biomásas de origen vegetal, en lugar de centrarse en un grupo específico de biomásas, como se han hecho en otras revisiones de la literatura (Ingrao et al., 2015; Ramlee et al., 2021; Ricciardi et al., 2020), se proporciona una perspectiva más amplia y completa sobre el uso de biomasa de origen vegetal en el sector de la construcción, incluyendo su forma natural o como aditivo en materiales compuestos.

2.2. METODOLOGÍA

Una revisión de la literatura sistemática se caracteriza por su enfoque riguroso y sistemático, al adoptar una metodología meticulosamente planificada, minuciosamente

ejecutada y con una clara transparencia en su proceso (Tranfield et al., 2003). De ahí la importancia de establecer una diseñar y documentar de manera exhaustiva el proceso metodológico, con el fin de asegurar que los pasos y criterios de inclusión y exclusión sean claros y objetivos para que puedan ser replicables por otros investigadores, permitiéndoles obtener resultados similares. Esta transparencia y replicabilidad son fundamentales para evaluar críticamente la revisión y garantizar la validez de los resultados (Tranfield et al., 2003), es decir, para asegurar la robustez de esta revisión.

A pesar de que las etapas que deben seguirse para realizar una revisión sistemática de la literatura pueden variar en función del campo de estudio y la metodología establecida, existe un consenso razonable acerca de las etapas que debe seguir una revisión sistemática (Davies y Crombie, 1998), que generalmente son tres (Tranfield et al., 2003):

- **Planificación de la revisión.** Consiste en planificar los pasos que se deben seguir para definir la propuesta. Se trata de un proceso iterativo de definición, aclaración y perfeccionamiento de los pasos necesarios (Alderson et al., 2004) para definir el protocolo definitivo y establecer los diferentes parámetros de estudio, palabras clave de búsqueda, bases de datos, etc.
- **Realización de la revisión.** Esta etapa arranca con una búsqueda sistemática que comienza con la identificación de palabras clave y términos de búsqueda, que se construyen a partir del estudio de alcance, la bibliografía y los debates en el seno del equipo de revisión. Seguidamente, se realiza una búsqueda sistemática en la base de datos que corresponda (en nuestro caso, *Web of Science -WoS-*) mediante las palabras clave seleccionadas. Sólo se incorporarán a la revisión los estudios que cumplan los criterios de inclusión. Una vez filtrados los resultados obtenidos en la búsqueda, se realiza un estudio cualitativo de los artículos incluidos en la revisión.
- **Análisis de los datos y difusión.** Esta etapa se centra en el análisis de los datos obtenidos y la difusión de los resultados. En esta fase se realizan los análisis estadísticos pertinentes, y se extraen las conclusiones prácticas.

Para identificar los artículos a incluir en esta revisión de la literatura, el 19 de octubre de 2021, se llevó a cabo un proceso de búsqueda de artículos en *WoS*, una base de datos caracterizada por sus estándares objetivos de selección de revistas y por su amplia difusión dentro de la comunidad académica (Perri y Peruffo, 2016). Se optó por utilizar toda la base de datos de *WoS* para evitar un potencial sesgo y/u omisión en el conjunto final de los artículos seleccionados si se hubiera considerado solo un conjunto de revistas relevantes (Wang et al., 2022). Sin embargo, limitamos nuestra búsqueda a artículos y revisiones publicados en inglés, como es común en la literatura (de Brito y Kurda, 2021), ya que solo las publicaciones revisadas por pares pueden considerarse

conocimiento validado y, por tanto, son aquellas con capacidad para generar mayor impacto en el discurso académico (Podsakoff et al., 2005). Es decir, libros, capítulos de libros, *proceedings* (excepto aquellos publicados en revistas que realizan un proceso de revisión por pares, como, por ejemplo, Saleh et al., 2020), y otras publicaciones no referenciadas, fueron excluidos de la revisión debido a la falta de procesos de revisión validados y a su impacto limitado en el campo (McWilliams et al., 2005). Para la búsqueda se crearon tres grupos de palabras clave directamente relacionadas con el tema de investigación: (1) palabras relacionadas con el material que emplearemos en nuestra investigación; (2) palabras relacionadas con las propiedades de los materiales que pretendemos investigar; y (3) palabras relacionadas con la aplicación de dichos materiales (ver [Tabla 2.1](#)). El proceso de búsqueda se llevó a cabo con todas las combinaciones de palabras posibles. El período de estudio seleccionado fue el máximo permitido por la base de datos, si bien el artículo más antiguo que se encontró fue publicado en 1930 (Gibson, 1930).

Tabla 2.1. Criterios utilizados para las búsquedas en WoS.

Palabras clave	(1) "Agricultural residue*"; "Agricultural waste*"; "Agro-residue*"; "Agro-waste*"; "Bio-based composite*"; "Bio-insulation*"; Biomass*; "Forest residue*" (2) Absorption; "Acoustic*"; Insulation; Isolation (3) "Bio-panel*"; Building*; Board*; Construction*; "Fabricated building"; Sustainable*; Wall*
Búsqueda en	Topic
Área de investigación	All
Idioma	English
Tipo de documento	Research article AND/OR review
Años	All

Como resultado del proceso de búsqueda se encontraron 4529 documentos, cuyos títulos y resúmenes fueron cualitativamente analizados para eliminar cualquier artículo duplicado o clasificado erróneamente. Para ello se utilizaron los siguientes indicadores de exclusión:

- a) Artículos no centrados en el estudio de las propiedades térmicas y/o acústicas de los materiales. Por ejemplo, artículos que analizan el uso de biomásas para eliminar metales o tintes de aguas contaminadas (Hossain et al., 2016), o para la fabricación de biocombustibles (Bastos, 2018).
- b) Artículos que analizan materiales que no son objeto de nuestra revisión por no ser biomásas, como, por ejemplo, lana mineral o lana de roca (de la Hera et al., 2017), conchas y moluscos (Eziefula et al., 2018), materiales a base de aerogeles (Ibrahim et al., 2019), colillas de cigarros (Gómez Escobar y Maderuelo-Sanz, 2017), materiales reciclados como el caucho de neumáticos (López-Zaldívar et al., 2017), el papel (Trematerra y Lombardi, 2017), el cartón corrugado (Asdrubali et al., 2016), los envases (Hassanin et al., 2018), los residuos derivados de la construcción (Elorza

- et al., 2021) o los desechos industriales como las escorias que se producen en los altos hornos (Farnood Ahmadi et al., 2018).
- c) Artículos que no estudian biomásas de origen vegetal, sino animal, tales como lana de oveja (del Rey et al., 2017) o las plumas de pollo (Kusno et al., 2019), entre otros.
 - d) Artículos sobre biomásas tratadas o modificadas químicamente (Liu et al., 2019), cenizas de biomásas o biomásas carbonizadas (Trivedi et al., 2018). Se determinó excluir estos materiales de la revisión puesto que la investigación se centra en biomásas de origen vegetal en su forma natural no procesada.
 - e) Artículos centrados en los métodos de análisis de las propiedades térmicas y acústicas, y no en el análisis de materiales biomásicos como tal (Baldinelli et al., 2019).
 - f) Artículos que analizan las propiedades aislantes del uso de la vegetación en fachadas o tejados, pero en los que no se fabrica un material físico (Vox et al., 2018).
 - g) Artículos de corte no empíricos, es decir, teóricos (Wang, 2011) o de revisión de la literatura (Giannotas et al., 2021; Ramlee et al., 2021).

Tras aplicar estos criterios de exclusión, en número de trabajos a incluir en la revisión se redujo a 354 (ver Anexo 1) artículos empíricos, publicados en 125 revistas, de las cuales sólo 48 han publicado más de 2 artículos (ver [Tabla 2.2](#)). *Construction and Building Materials* es la revista que han publicado más artículos sobre el tema (12,99% del total), seguida por *Applied Acoustic* (6,50%), y *Energy & Buildings* (4,52%).

Tabla 2.2. Número de publicaciones por revista*.

Título de la revista	Nº de artículos
Construction and Building Materials	46
Applied Acoustics	23
Energy & Buildings	16
BioResources	15
Industrial Crops and Products	11
Journal of Cleaner Production	11
Materials	10
Journal of Building Engineering	9
Polymers	9
Advanced Materials Research	8
IOP Conference Series-Materials Science and Engineering	8
Sustainability	7
Procedia Engineering	7
Applied Sciences	6
Building and Environment	6
Energy Procedia	5
Journal of Natural Fibers	5
European Journal of Wood and Wood Products	4
Forests	4
Journal of Materials in Civil Engineering	4
Buildings	3
Composites: Part B	3

IOP Conference Series- Earth and Environmental Science	3
Journal of Composite Materials	3
Journal of Wood Science	3
Waste and Biomass Valorization	3
Wood Research	3
Akustika	2
Bioresource Technology	2
Coatings	2
Composites part A-Applied Science and Manufacturing	2
Composite Structures	2
Energies	2
Forests Products Journal	2
Holzforschung	2
International Journal of Environmental Science and Technology	2
Journal of Green Building	2
Journal of the Faculty of Agriculture Kyushu University	2
Journal of the Korean-Wood Science and Technology	2
Journal of Tropical Forest Science	2
Materiales de Construcción	2
Materiale Plastice	2
Procedia Manufacturing	2
Resources, Conservation & Recycling	2
Slovak Journal of Civil Engineering	2
Thermal Science	2
Número de revistas que han publicado un solo artículo	78
Total de revistas	125

*Se incluyen sólo las revistas que han publicado 2 o más artículos

2.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.3.1. EVOLUCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

El primer artículo incluido en nuestra revisión fue publicado en 1930 (Gibson, 1930). Sin embargo, el segundo no apareció hasta seis décadas después (Sampathrajan et al., 1991). A partir de ahí y hasta 2009 hay un período en el que alternan años en los que no se publica ningún artículo (1931-1990, 1992, 1994-2002, 2005), con años en los que se publican uno (1930, 1991, 1993, 2003, 2004, 2006, 2007) o dos artículos (2008-2009). No obstante, a partir de 2010 se observa un notable incremento en el número de publicaciones sobre el tema (de hecho, el 96,9% de los artículos incluidos en esta revisión sistemática de la literatura se han publicado a partir de ese año), alcanzando su punto máximo en 2019 con la publicación de 59 artículos (ver [Figura 2.1](#)). El interés por el estudio de materiales de construcción basados en biomasas es, por tanto, relativamente reciente. A pesar de ello, se observa que el interés es claramente creciente (e.g., Barbero-Barrera et al., 2021; Guna et al. 2021; Jeon et al., 2021; Tamas-Gavrea et al., 2021) debido a que parece ser una opción muy interesante para su uso en construcción porque permite

tanto evitar su quema in situ como ahorrar energía que de otra manera se desperdiciaría (Liu et al., 2017). El creciente interés en el tema y la dispersión de las publicaciones sobre el tema (la literatura existente se dispersa en más de un centenar de revistas) justifican la necesidad de llevar a cabo una revisión sistemática de la literatura que permita integrar el conocimiento existente.

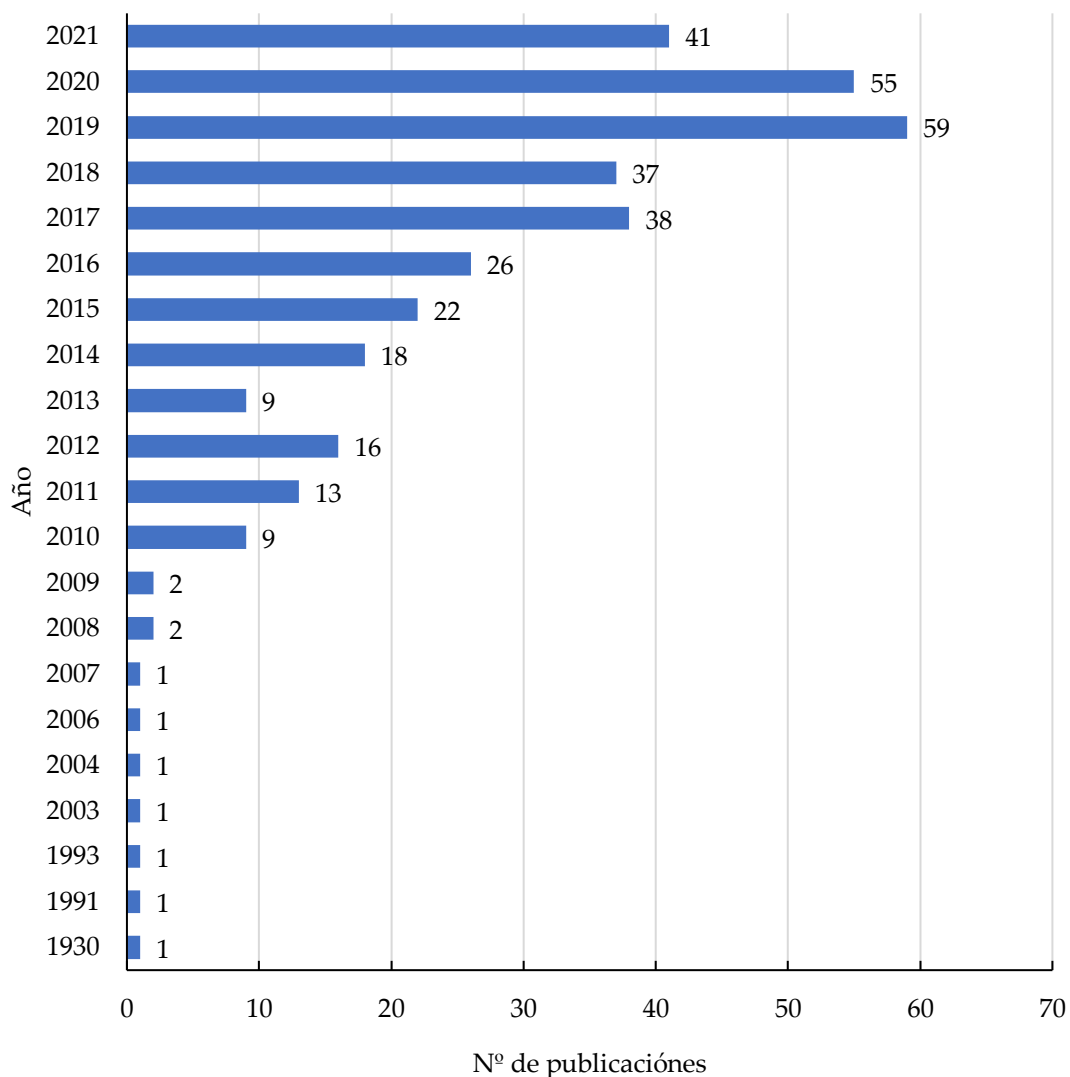


Figura 2.1. Número de publicaciones por año.

2.3.2. BIOMASAS ESTUDIADAS

Los trabajos incluidos en esta revisión han estudiado un conjunto de 42 variedades distintas de biomásas para su aplicación en la preparación de materiales de construcción (ver [Figura 2.2](#)), siendo la madera la biomasa más investigada, estudiada por el 25,71% (91 artículos) de los artículos.

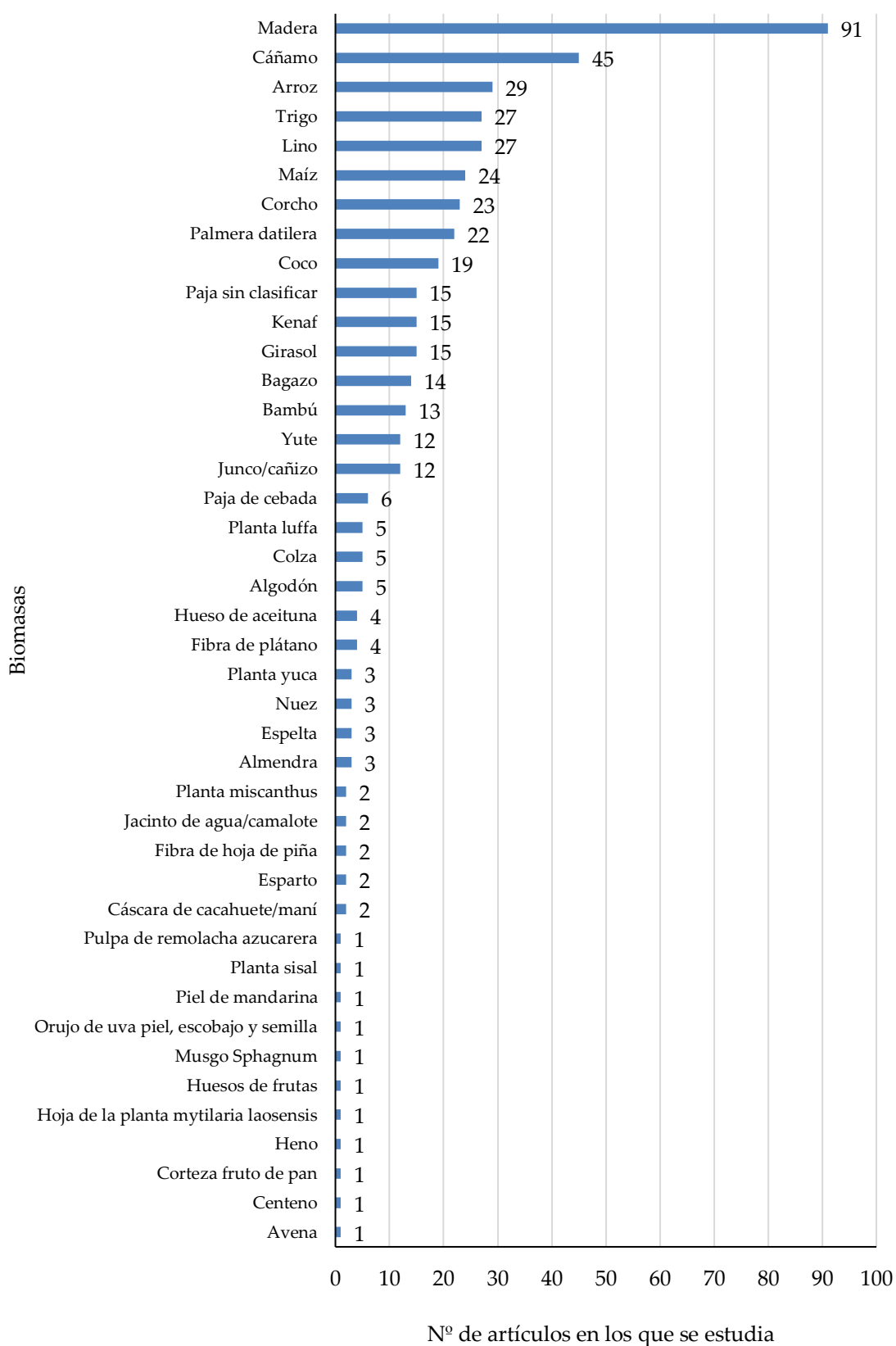


Figura 2.2. Artículos en los que se estudia cada variedad de biomasa.

2.3.2.1. Madera

Los motivos que explican el interés de la academia por las propiedades térmicas y acústicas de la madera (e.g., Ostendorf et al., 2021; Segovia et al., 2020; Tudor et al., 2021; Wimmers et al. 2019) pueden ser varios. Primero, la madera es un material tradicionalmente usado en la construcción, debido a su demostrada versatilidad y resistencia (Pramreiter et al., 2023). Segundo, en un contexto de creciente conciencia sobre la necesidad de adoptar prácticas constructivas más respetuosas con el entorno (Alabduljabbar et al., 2020), la madera resulta una alternativa prometedora gracias a su capacidad de capturar y almacenar carbono, contribuyendo así a la mitigación del cambio climático (Pramreiter et al., 2023). Tercero, la biomasa es un material ampliamente disponible en diversas regiones del mundo, gracias a su producción forestal sostenible y a la existencia de plantaciones dedicadas a su cultivo. Esto asegura un suministro constante y accesible, facilitando la realización de estudios y experimentos a gran escala en el ámbito científico (Švajlenka y Pošiváková, 2023). Otro motivo que explica el interés en esta biomasa está relacionado con sus propiedades únicas. La madera presenta una estructura celular singular que le otorga propiedades físicas y mecánicas únicas que la hacen altamente adecuada para diversas aplicaciones constructivas (Zhang et al., 2022) dado que le proporcionan una elevada ligereza y capacidad de aislamiento térmico y acústico, convirtiéndola en un material versátil y eficiente en términos energéticos (Asdrubali et al., 2017). Además, su facilidad de manipulación, corte y ensamblaje permite una mayor flexibilidad en el diseño y construcción de estructuras (Pramreiter et al., 2023), y el desarrollo de tecnologías y métodos de procesamiento avanzados en la industria de la madera ha permitido, además, mejorar la calidad, durabilidad y resistencia de la madera (Duan et al., 2023).

Entre las especies de árboles de las que se extrae la madera investigada, los más comunes son el pino y el abeto, estudiadas por el 16,48% y el 9,89% de los artículos respectivamente (ver [Tabla 2.3](#)).

Tabla 2.3. Número de artículos en los que se estudia cada subtipo de madera.

Tipo de madera	Nº de artículos
Pino	15
Abeto	9
Alerce	8
Álamo	7
Haya	5
Olivo	5
Abedul	4
Roble	4
Eucalipto	3
Nogal	3

Caoba	2
Sarmientos de vid	2
"Langosta negra"	2
Paulownia	2
Acacia	1
Aguacate	1
Carpe	1
Castaño	1
Cedro	1
Ciprés	1
Gelam	1
Durazno	1
Enebro	1
Ficus carica	1
Fresno	1
Manzano	1
Milicia excelsa	1
Morus	1
Pinanga manii	1
Plátano oriental especie arbórea caducifolia	1
Polvo madera palmera datilera	1
Prunus domestica	1
Secoya	1
Sengon	1
Tilo	1
Tipología de madera no especificada	50

2.3.2.2. Cáñamo

La segunda biomasa vegetal más estudiada por la literatura ha sido el cáñamo, estudiado en un 12,71% de los artículos revisados. El cáñamo es considerado un recurso renovable de bajo impacto puesto que, en comparación con otras plantas, como el algodón, el cáñamo requiere menos agua y fertilizantes para su cultivo (Ingrao et al., 2015; Sassoni et al., 2014). Asimismo, durante su crecimiento, el cáñamo tiene la capacidad de capturar grandes cantidades de dióxido de carbono (Pervaiz y Sain, 2003) y posee propiedades físicas y mecánicas sobresalientes (Delhomme et al., 2020) que lo hacen atractivo como material de construcción (Ingrao et al., 2015). Su alta capacidad de aislamiento térmico (Gaujena et al., 2020) y acústico (Glé et al., 2013) puede contribuir a la eficiencia energética de los edificios (Ingrao et al., 2015; Sassoni et al., 2014). Además, el cáñamo se puede utilizar en diversas aplicaciones, como paneles de construcción (Pennacchio et al., 2017), morteros (Parcesepe et al., 2021) y otros elementos estructurales (Sassoni et al., 2014); y se puede combinar con otros materiales, como la cal (Kinnane et al., 2016; Parcesepe et al., 2021), o el cemento (Fernea et al., 2019) para mejorar las propiedades térmicas y acústicas de estos materiales constructivos.

2.3.2.3. Otros

El tercer recurso biomásico más investigado es el arroz (Buratti et al., 2018; Son et al., 2017; Yang et al., 2003), estudiado por el 8,19% de los artículos. Curiosamente el arroz es también el tercer producto básico más producido en el mundo, después de la caña de azúcar y el maíz, con 740 millones de toneladas anuales (Buratti et al., 2018). Aunque ha sido mucho menos estudiado que la madera o el cáñamo, la investigación ha demostrado que tiene aceptables características de absorción acústica y valores de conductividad térmica en el intervalo de 0,046-0,057 W/mK (Buratti et al., 2018), comparables a los de otras biomásas como la paja de trigo o el cáñamo con valores de 0,044 y 0,051, respectivamente (Laborel-Préneron et al., 2017). Las partes de la planta de arroz más estudiadas han sido la cáscara (*rice husk*) (António et al., 2018; Antunes et al., 2019; Buratti et al., 2018; Muthuraj et al., 2019; Pachla et al., 2021) y la paja (*rice straw*) (Pachla et al., 2021), que es la parte de la planta que queda después de la cosecha, cuando se retiran los granos de arroz. Entre las biomásas menos estudiadas se encuentran los huesos de fruta (Gadea Borrell et al., 2020), el centeno (Tůmová et al., 2017), la avena (Bakatovich et al., 2018), la pulpa de remolacha (Karaky et al., 2018) o el jacinto de agua (Salas-Ruiz et al., 2019; Salas-Ruiz y Barbero-Barrera, 2019).

Las biomásas investigadas por los artículos incluidos en esta revisión han sido utilizadas en diferentes formas y tamaños (ver [Tabla 2.4](#)). Se han encontrado partículas grandes (Hussein et al., 2019) y pequeñas (Bories et al., 2016), fibras³ largas (Tămaş-Gavrea et al., 2021) y cortas (Hosseini Fouladi et al., 2011), tejidos (Bujoreanu et al., 2017) y fieltros (Gomez et al., 2020a,b). En muchos casos, la determinación del diámetro y longitud de las fibras está indicada en promedio (Hosseini Fouladi et al., 2011) y otra vez proporcionan el error de la medida (Gomez et al., 2020a,b). Así, se han empleado fibras con una longitud de hasta 30 cm (Tămaş-Gavrea et al., 2021) o inferiores a los 5 cm (Hosseini Fouladi et al., 2011) con diámetros de entre 22,8 µm (Raj et al., 2020b) y 500 µm (Or et al., 2017). Para separar los sólidos en función de su tamaño de partícula se utilizan instrumentos como las tamizadoras (Ferrández-García et al., 2018) con tamices normalizados de diferentes aberturas. Para cortar o trocear las materias primas y obtener partículas más pequeñas se suelen utilizar diferentes utensilios como cortadoras de cuchillas (Salas-Ruiz y Barbero-Barrera, 2019) o trituradoras (Kang et al., 2019b).

Tabla 2.4. Formas y tamaños de biomásas utilizadas en los materiales aislantes.

Forma de biomasa	Tamaño (mm)	Referencias
Partículas	0,16-40	Bories et al. (2016); Boubel et al. (2021); Gößwald et al. (2021); Hussein et al. (2019); Jayamani et al.

³ Las fibras se diferencian de las partículas en que presentan una longitud considerable en comparación con su diámetro. Normalmente en los trabajos que estudian fibras no viene reflejado el tamaño y sí el diámetro.

			(2015); Muñoz y Trotta (2015); Salas-Ruiz et al. (2019); Sassoni et al. (2014); Yang et al. (2003)
	Longitud (cm)	Diámetro (μm)	
Fibras	4,86-30	12-500	Hosseini Fouladi et al. (2011); Liu et al. (2012); Or et al. (2017); Raj et al. (Raj et al., 2020b); Taban et al. (2020a); Tămaș-Gavrea et al. (2021)
Fieltros (<i>non-woven fibres, mat</i>) <i>random distribution</i>)	5	58,6-267,8	Gomez et al. (2020b); Raj et al. (2020a)
Tejidos (<i>woven fibres, fabrics</i>)	N/E	N/E	Bujoreanu et al. (2017)

Abreviatura: N/E: No especificado

2.3.3. SUSTANCIAS DE UNIÓN

Los aglutinantes o ligantes en un material compuesto son sustancias que se utilizan para unir o cohesionar los componentes individuales de un material compuesto y darle cohesión estructural (Callister y Rethwisch, 2018). Así, los aglutinantes dan forma a los componentes, lo que contribuye a las propiedades físicas y mecánicas del material en su conjunto (Callister y Rethwisch, 2018). De la revisión bibliográfica realizada, se extrae que, durante la preparación de los materiales a base de partículas o fibras de biomásas, se emplean ligantes o aglutinantes muy variados que, atendiendo a su naturaleza, se pueden clasificar en tres grandes grupos: orgánicos, inorgánicos o híbridos orgánico-inorgánico, pudiendo haber en cada grupo, materiales de origen natural o artificial (sintético).

Dentro de los *aglutinantes orgánicos*, que son materiales constituidos por compuestos químicos que contienen átomos de carbono (De Longcamp y Mouton, 2013), establecemos dos subgrupos: los derivados del petróleo o de sus subproductos, y los aglutinantes orgánicos no derivados del petróleo. Entre los derivados del petróleo o de sus subproductos, el más estudiado (ver [Figura 2.3](#)) ha sido la resina de urea-formaldehído (UF), investigada por el 30,56% de los artículos.

La UF es una resina termoendurecible no transparente que se utiliza ampliamente como adhesivo aglutinante para la producción de paneles derivados de la madera, como tableros de fibra de densidad media, tableros de partículas y contrachapados de madera dura para usos interiores (Kevin, 2018). Esta resina es un excelente adhesivo, tiene bajo coste, presenta aceptable resistencia al moho y a los hongos y es fácilmente manipulable (Kevin, 2018). La resina UF se puede combinar con éxito con la mayoría de las especies de madera en muchas combinaciones (Kevin, 2018). Sin embargo, al ser un polímero termoestable no es reciclable ni reutilizable al finalizar

su ciclo de vida, y puede ser tóxico por la presencia de compuestos orgánicos volátiles nocivos (Fernandes et al., 2011). Esta resina se ha estudiado, por ejemplo, para crear materiales compuestos junto a la palmera datilera (8,33%) o el bagazo (8,33%), entre otras biomásas. Como alternativa a esta resina, diversos autores han empleado el alcohol polivinílico, PVA (Bakatovich et al., 2018; Taban et al., 2020a), un polímero termoplástico que parece ser un aglutinante adecuado debido a su biodegradabilidad, su alta polaridad, sus buenas propiedades mecánicas y su fácil procesabilidad biodegradable (Tan et al., 2015). Este polímero se ha utilizado, por ejemplo, para fabricar muestras con partículas de kenaf (Taban et al., 2021c), fibras de bagazo o maíz (Taban et al., 2021a), entre otros.

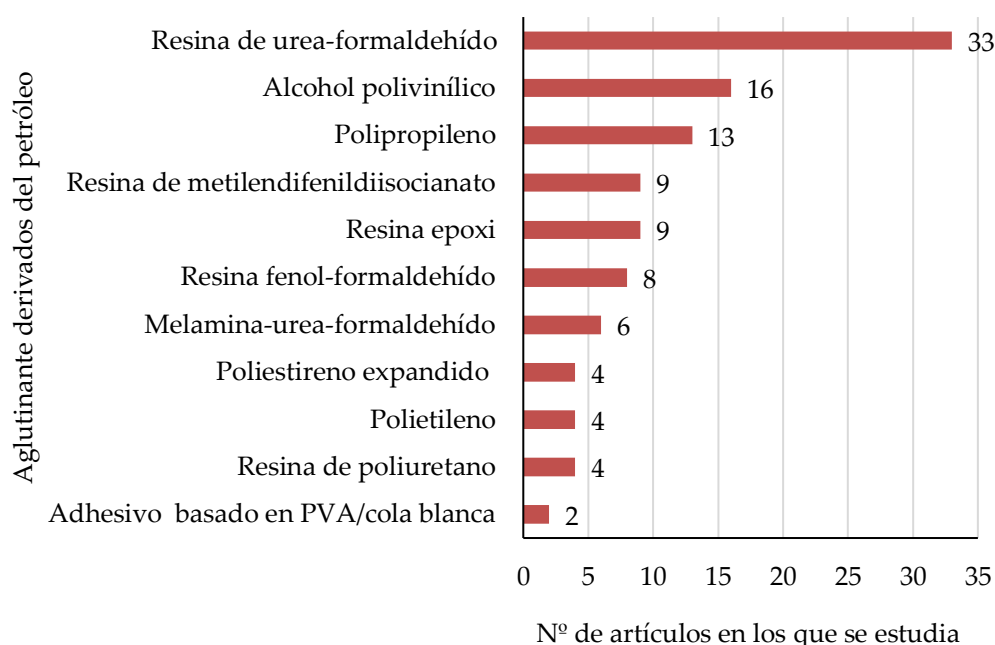


Figura 2.3. Aglutinantes derivados del petróleo estudiados por dos o más artículos

En la [Figura 2.4](#) se muestran los aglutinantes de origen orgánico no fósil más estudiados. El más estudiado dentro de esta categoría ha sido el ácido poliláctico, PLA (21,28%), seguido por el almidón de maíz (17,02%) y el látex (12,77%).

El PLA es un polímero alifático artificial de origen biológico y susceptible por degradación enzimática (Kamau-Devers et al., 2019). Esta capacidad de degradación y la falta de dependencia con materias primas fósiles han hecho que este polímero sea considerado como respetuoso con el medio ambiente (Kamau-Devers et al., 2019). Un total de 12 tipos de biomásas han sido mezcladas y analizadas con el PLA, siendo la más empleada el lino (19,05%), seguido de la madera (14,29%). Entre los aglutinantes menos investigados (por sólo un artículo cada uno) se encuentran la goma guar o guaran (Mati-Baouche et al., 2015), el adhesivo de base biológica preparado a partir de una mezcla de glicerol crudo y ácido cítrico (Segovia et al., 2020), el alginato (Mayer-Laigle et al., 2021),

la melaza (subproducto de la industria azucarera) (Viel et al., 2019a), la lignina (Ostendorf et al., 2021), el gluten de trigo (Nguyen et al., 2018a), las biorresinas a base de aceite de cáñamo (Balo y Sua, 2018) o un aglutinante biodegradable a base de poli (adipato de butileno-co-tereftalato)/ácido poliláctico (PBAT/PLA) (Muthuraj et al., 2019).

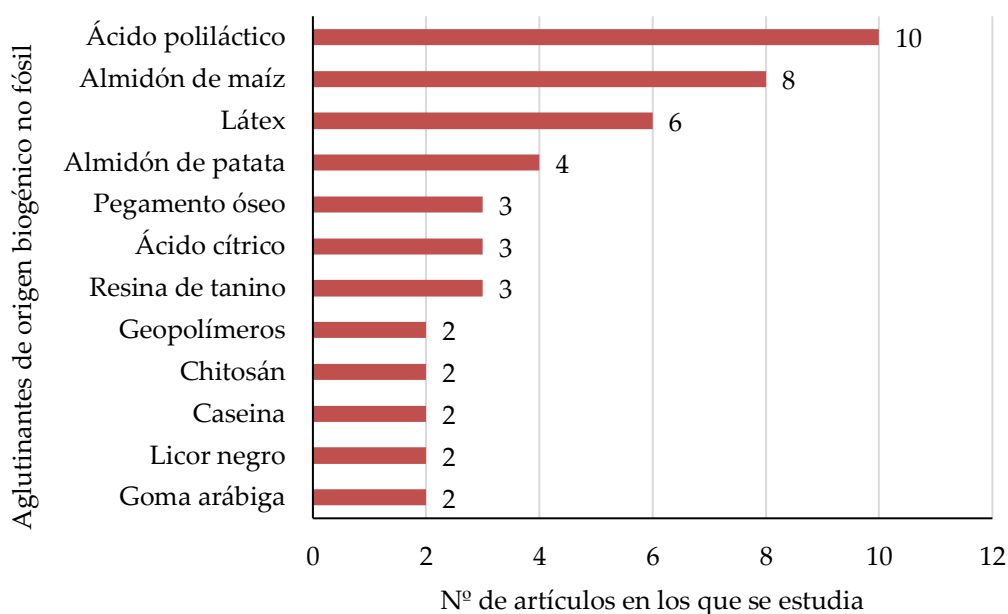


Figura 2.4. Aglutinantes de origen biogénico no fósil estudiados por dos o más artículos

En el grupo de los *aglutinantes inorgánicos* (minerales) los más estudiados son (ver [Figura 2.5](#)) el cemento (estudiado por el 38,05% de los artículos), el yeso (16,81% de los artículos), varios tipos de cal (15,93% de los artículos) y la arcilla (15,04% de los artículos).

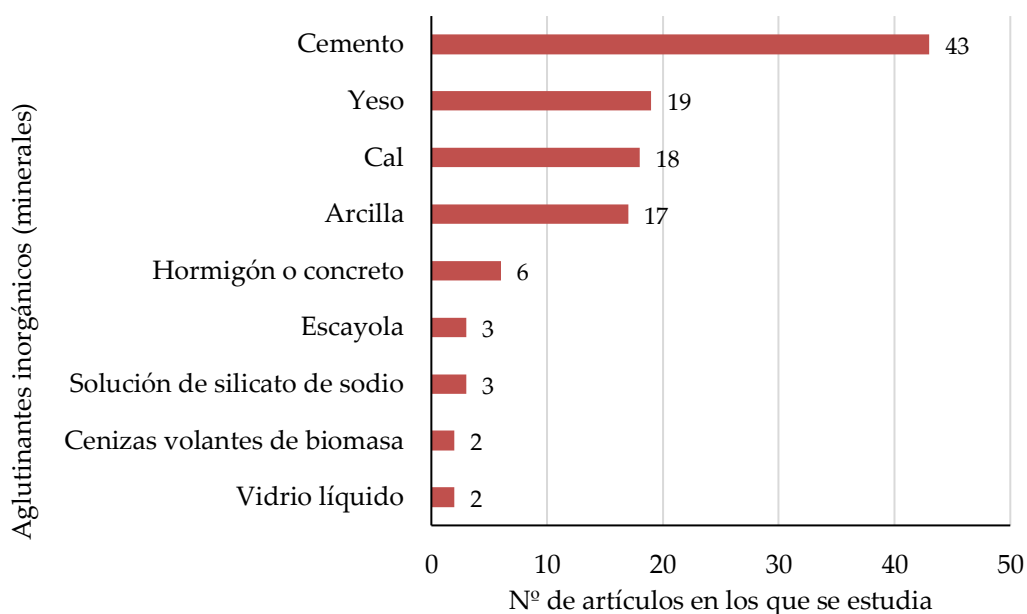


Figura 2.5. Aglutinantes de tipo inorgánico estudiados por dos o más artículos

Algunos aglutinantes han sido analizados por tan solo un artículo (por ello no se han incluido en la [Figura 2.5](#)), como son la pumita basáltica (Binici et al., 2007), la magnesita (Georgiev et al., 2019) o el metacaolín (Liu et al., 2019). Se han empleado 20 tipos de biomasa mezcladas con cemento, si bien la biomasa más analizada ha sido el cáñamo (20,83%), seguido por el maíz (10,42%) y la madera de especies sin especificar (10,42%).

Por otro lado, se ha empleado también un aglutinante híbrido orgánico-inorgánico a base de óxido de magnesio el cual ha sido patentado (WO2013061182A1) (Sassoni et al., 2014). Así mismo, se ha empleado como aglutinante el denominado “hormigón de cáñamo” que es un material de construcción que combina fibras de cáñamo con una mezcla de cal y agua (Arnaud y Gourlay, 2012), resultando en un material más ligero y por tener mejores propiedades aislantes y de regulación de la humedad que el hormigón tradicional (Arnaud y Gourlay, 2012). Además, es considerado más respetuoso con el medio ambiente debido a su proceso de fabricación y a su capacidad para absorber dióxido de carbono a medida que se endurece (Arnaud y Gourlay, 2012).

De forma general se puede decir que, de todos los grupos de aglutinantes estudiados, el más investigado ha sido el grupo de inorgánicos (minerales), destacando dentro de este grupo el cemento, la cal y el yeso. La principal razón para utilizar estos materiales de construcción en combinación con biomasa es lograr un aumento en el aislamiento térmico del material de construcción (Jelle, 2011). La biomasa suele contener aire atrapado en su estructura celular, lo que la hace un buen aislante térmico y acústico (Sağlam et al., 2022). Al agregar biomasa al cemento, por ejemplo, se introducen bolsas de aire en el material compuesto, lo que disminuye su conductividad térmica (Jelle, 2011). Con ello, también se consigue mejorar las propiedades acústicas del cemento y reducir las emisiones de gases contaminantes al disminuir la cantidad del material constructivo (Arrigoni et al., 2017; Liu et al., 2017). El uso de materiales naturales de base biológica introduce un nuevo enfoque potencial para la evolución de futuros productos biocompatibles y no tóxicos (Walia et al., 2023).

De los 354 artículos incluidos en esta revisión sistemática de la literatura, 63 se centran en materiales a base de biomasa sin el empleo de aglutinantes específicos. Las biomasa utilizadas han sido las siguientes: kenaf (Xu et al., 2004), corteza de abeto (Göşwald et al., 2021), corteza de la melaleuca o gelam (Christy et al., 2021), tallo de girasol (Lenormand et al., 2017), planta de lino (Chabriac et al., 2016; Korjenic et al., 2011), tallo de algodón (Zhou et al., 2010), cáscara de coco (Panyakaew y Fotios, 2011), bagazo (Panyakaew y Fotios, 2011), paja de arroz (Sabapathy y Gedupudi, 2019) y jacinto de agua (Salas-Ruiz y Barbero-Barrera, 2019).

Normalmente, la mezcla de las partículas de biomasa con otros materiales constructivos, resinas, polímeros termoestables o colas suele realizarse de forma manual (Salas-Ruiz y Barbero-Barrera, 2019) o utilizando mezcladores de laboratorio (Almalkawi et al., 2019; Chen et al., 2017; Chin et al., 2018; Kain et al., 2016) durante un cierto tiempo, normalmente especificado, antes de verter la mezcla en un molde.

Por otro lado, a la hora de mezclar componentes los investigadores suelen elegir y analizar diferentes ratios biomasa/aglutinante, ya que las propiedades finales del material dependen del contenido de biomasa y fracción de volumen de los componentes. Por ejemplo, al aumentar la cantidad de partículas o fibras en el material a base de cemento suele disminuir la resistencia mecánica del material (Aamr-Daya et al., 2008; Vitale et al., 2021) pero mejorar sus propiedades de aislamiento térmico (Salas-Ruiz y Barbero-Barrera, 2019) o la absorción acústica (Chen et al., 2017). Sin embargo, esta dependencia varía según el tipo de biomasa, el tipo de aglutinante y el tamaño de partícula de la biomasa, entre otros aspectos. Por ejemplo, Salas-Ruiz y Barbero-Barrera (2019) observaron que, en el caso de materiales a base de cemento, un aumento del tamaño de las partículas de tallo de jacinto de agua no sólo da lugar a una disminución de la conductividad térmica del material compuesto, sino también a una disminución de la densidad, un aumento de la absorción de agua y una clara reducción de la resistencia mecánica.

2.3.4. FORMATOS DE PRESENTACIÓN DEL MATERIAL ESTUDIADO

En la investigación científica sobre materiales basados en biomásas para su empleo en la construcción, se han preparado muestras que tienen diversas formas, estructuras y composiciones (paneles, productos compuestos, mantas, hojas, fieltros, tableros de partículas y bloques de construcción, entre otros). Posteriormente se han analizado las propiedades de estos materiales con la finalidad de evaluar su potencial para reemplazar o mejorar materiales aislantes convencionales como la fibra de vidrio, el poliestireno expandido, el poliuretano, las resinas, etc. La elección del tipo, forma y tamaño de muestra de material a preparar ha estado principalmente determinada por los objetivos de la investigación, las técnicas de caracterización utilizadas (normativas), la aplicación final deseada y las características específicas buscadas en el producto terminado. Por ejemplo, si se busca un material para aislamiento acústico que sea además ligero, se puede optar por la preparación de muestras cúbicas de fieltro a base de fibras de lino (Hajj et al., 2011). Si bien, si se prioriza el aislamiento térmico y la ligereza del material, se pueden preparar prismas de un compuesto de cemento que contiene partículas de subproductos biomásicos del lino (Aamr-Daya et al., 2008). Sin embargo, algunos estudios no especifican claramente la forma del material analizado, refiriéndose al material de forma genérica como un compuesto (Aamr-Daya et al., 2008),

o caracterizando las muestras sin considerar la forma final de aplicación del producto (Khidir et al., 2014; Ramis et al., 2010)

En la presente revisión se ha encontrado que los materiales preparados más investigados (ver [Tabla 2.5](#)) son los denominados *paneles* (72,60%), materiales preparados con fibras o partículas de biomásas prensadas o no y mezcladas con algún tipo de sustancia de unión entre las partículas (incluyendo inorgánicas y orgánicas). En este grupo se incluyen los "paneles de partículas/fibras" (Pásztor et al., 2017), los "paneles tipo sandwich" (Huang et al., 2013b), o los paneles compuestos con dos capas exteriores rígidas y un núcleo interno muy ligero (Jamaluddin et al., 2020; Pavelek y Adamová, 2019), los tableros o tablas (Abu-Jdayil et al., 2021), las láminas (Iannace et al., 2020), las placas o planchas (Pedreño-Rojas et al., 2017), las losas (Korjenic et al., 2011), o similares. Aunque no es una norma, en este grupo se suele especificar las dimensiones y la forma final de las muestras que suele variar según su propósito de aplicación (Salas-Ruiz et al., 2019; Tămas-Gavrea et al., 2021; Vitale et al., 2021).

Tabla 2.5. Formatos de presentación de muestras.

Tipo de configuraciones de muestras	Nº de artículos
Paneles (tableros y tablas, láminas, pacas y planchas, losas, etc.)	257
Material en bruto (fibras o partículas sueltas, "raw material")	38
Muestras particuladas (sin aglutinante, tejidos, fieltros, etc.)	30
Elementos estructurales (ladrillos, paredes, vigas, revestimientos, etc.) y construcciones en general	28
Bioespumas	1

Las muestras denominadas *material en bruto* son el segundo tipo de material más investigado, siendo usado por el 10,73% de los artículos. Este grupo incluye a las partículas o fibras de origen biológico sueltas no compactadas. Estas han sido consideradas por diversos investigadores como potencial material para su aplicación en el aislamiento térmico o acústico (Khidir et al., 2014; Or et al., 2017; Vasilache et al., 2010).

Como tercer agrupamiento de formato o configuraciones de muestras, se encuentran los materiales compuestos de partículas biomásicas (*muestras particuladas*) sin utilizar aglutinante (usada por el 8,47% de los artículos). En estos trabajos la forma final de las muestras suele adaptarse a la requerida en las técnicas de caracterización utilizadas para su posterior análisis (Hasan et al. 2020; Ricciardi et al. 2021; Zhant et al. 2021).

En el cuarto grupo se han considerado los *elementos estructurales* (estudiados por el 7,91% de los artículos). Este grupo incluye componentes o partes de una estructura diseñados para resistir cargas y transmitirlos de manera efectiva en construcciones. Elementos incluidos en este grupo han sido los ladrillos (Binici et al., 2007), vigas (Cravo

et al., 2017), pilares (Mutani et al., 2020), y similares y que se han fabricado como tales mezclando normalmente materiales de construcción con partículas o fibras de biomasa (Ahmadi et al., 2020; Barreca et al., 2013a; Jin et al., 2021). En este grupo también se han incluido trabajos que han realizado construcciones como casas (Teslík et al., 2014b), prototipos de paneles fonoabsorbentes (Negro et al., 2016) o prototipos de módulos de construcción (Barreca y Tirella, 2017). Finalmente, se ha incluido un estudio que ha preparado una bioespuma o espuma biohíbrida a partir de polvo de gluten de trigo y un compuesto de sílice (Wu et al., 2014).

2.3.5. MÉTODOS DE PREPARACIÓN DE MUESTRAS

En los artículos revisados se han empleado diferentes métodos de preparación para obtener las muestras (ver [Tabla 2.6](#)). Algunos estudios han utilizado la biomasa en su forma natural sin ningún tipo de adecuación, procesado o tratamiento previo (Laborel-Préneron et al., 2017). Sin embargo, en la mayoría de los casos, se ha realizado un tratamiento o procesado de las biomasa hasta llegar al material final objeto de estudio (Mayer-Laigle et al., 2021; Pisello et al., 2016). Generalmente, las biomasa pasan primero por un proceso inicial de secado, corte, trituración, etc., para posteriormente ser tratadas individualmente o mezcladas con otros materiales (biomasa, materiales de construcción tradicionales, espumantes, ligantes, etc.) y procesarlas para obtener el material final (Casas-Ledón et al., 2020). Los artículos incluidos en esta revisión (ver [Tabla 2.6](#)) indican que los procesos de moldeo, en todas sus variantes (por prensado, por inyección, por extrusión, por inyección de vapor, etc.), han sido, con una gran diferencia respecto al resto, los más empleados (64,97%), seguidos por los de prensado (sin molde) (9,04%).

Tabla 2.6. Procesos de fabricación empleados.

Procesos de fabricación empleados	Nº de artículos
Moldeo	230
Prensado (sin molde)	32
Extrusión	2
Cardado y peinado	1
Conformación aerodinámica	1
Cosido	1
Laminado	1
Maquinado con CNC	1
Método de despulpado	1
Método de unión bicomponente (air-lay)	1
Proceso no especificado, otros	91

Los procesos de moldeo crean objetos tridimensionales al inyectar o verter material en un molde cerrado (Rana y Bandyopadhyay, 2013). Varios trabajos coinciden

en que los procesos de moldeo son una buena opción para la producción de bioaislantes con buenas propiedades mecánicas, térmicas y una densidad aceptable (Dhakal et al., 2017; Liu et al., 2017). En estos métodos, las propiedades finales de las muestras suelen diferir al modificar ciertos parámetros durante el proceso como son los tiempos de moldeo, la temperatura del molde, los tiempos de compresión o la magnitud de la carga de compresión (Nguyen et al., 2018b; Rana y Bandyopadhyay, 2013). Sin embargo, estos procesos también pueden presentar ciertos inconvenientes, pues los materiales obtenidos suelen caracterizarse por su poca durabilidad, propiedades mecánicas inferiores, baja capacidad impermeable, baja resistencia al fuego, etc. (Liu et al., 2017).

En los artículos incluidos en esta revisión se han utilizado diferentes métodos en función de las condiciones de temperatura y presión empleadas durante el proceso (ver Tabla 2.6), destacando el moldeo sin prensado (22,32%), el moldeo por prensado a temperatura ambiente (19,49%) y el moldeo por prensado en caliente (19,77%). En los estudios que utilizan el moldeo sin prensado, las biomásas acondicionadas suelen mezclarse con agua y materiales constructivos como el cemento (Lahouioui et al., 2020; Philip y Rakendu, 2020; Sharma et al., 2021; Yoon et al., 2020) o el yeso (Adamopoulos et al., 2015; Guna, Yadav, et al., 2021; Hankhantod et al., 2022). En este caso, la solidificación de la mezcla se realiza en un molde sin ejercer presión durante cierto tiempo. Los procesos de moldeo por prensado suelen emplearse en la preparación de tableros de partículas de biomásas mezcladas con colas (Nguyen et al., 2018a,b) o resinas (Ghofrani et al., 2017). En estos casos, durante el proceso se suelen controlar tanto la presión como la temperatura, parámetros que dependen de tipo de material a procesar (Singh et al., 2013).

Adicionalmente, los métodos de inyección consisten en inyectar material fundido o plástico en un molde de forma precisa y luego permitir que se enfríe y solidifique (Farooque et al., 2020). Los parámetros que se suelen controlar en este proceso son la temperatura del extrusor del inyector, la temperatura del molde o la presión de inyección (Farooque et al., 2020; Luthra et al., 2019; Singh et al., 2013). Con estos procedimientos se pueden insertar fibras naturales en forma de fibras cortas y largas en una matriz orgánica (Aisenbrey y Frommann, 2010). Dentro de estos procesos existen algunas variantes como el proceso de moldeo por inyección de vapor, que utiliza vapor como fuente de calor para aumentar la temperatura de la cavidad del molde de inyección (Jeng et al., 2010). Normalmente, estos procesos implican un mayor consumo de energía y tratamientos más complejos (Baharudin et al., 2017).

Además, como métodos de prensado sin molde se han considerado aquellos que obtienen las muestras mediante compactación con ayuda de planchas metálicas (Huda y Yang, 2009) o una prensa de laboratorio (Kain et al., 2020; Tudor et al., 2021) y suelen obtener planchas del material relativamente grandes que en algunos casos son cortadas

posteriormente para obtener el tamaño deseado (Kain et al., 2020; Tudor et al., 2021) y en otros no (Huda y Yang, 2009). También se han incluido en este grupo aquellos artículos que no especifican el uso de un molde (Berardi y Iannace, 2015; et al., 2020). Entre las investigaciones que ha utilizado métodos de prensado sin molde hay estudios en los que se controla la presión de compactación y la temperatura (Ferrandez-García et al., 2017; Nguyen et al., 2018b; Yang et al., 2003).

Finalmente, de la Tabla 2.6. se destaca el elevado número de artículos en los que no se especifica el método de preparación de las muestras (25,99%). A modo de ejemplo, Collet et al. (2017) dicen no revelar el proceso empleado por motivos de confidencialidad mientras que otros como Nemec et al. (2019) parten de muestras basadas en fibras de madera ya elaboradas en origen.

2.3.6. PROPIEDADES ESTUDIADAS

De los 354 artículos incluidos en esta revisión, el 48,59% ha analizado las propiedades térmicas (pero no acústicas) de las biomásas, el 29,66% ha estudiado sus propiedades acústicas (pero no térmicas), y el 21,75% restante ha analizado tanto sus propiedades térmicas como sus propiedades acústicas.

Entre las propiedades térmicas, la más estudiada ha sido la conductividad térmica (87,55% del total de artículos que analizan las propiedades térmicas), que mide la capacidad de los materiales para transmitir la energía térmica a través de ellos (Yang, 2004). En la Tabla 2.7 se muestran, a modo de ejemplo los valores de la conductividad térmica de aquellos materiales preparados con las cinco biomásas más estudiadas (ver sección 2.3.2). Para facilitar la comparación, los materiales se han agrupado por tipo de aglutinante utilizado. Además, también se han incluido los materiales preparados sin aglutinantes. Dentro del grupo de los materiales preparados a base de cáñamo sin aglutinante (ver Tabla 2.7), hay varios trabajos que coinciden en que la conductividad térmica se encuentra en torno a los 0,05 W/mK (Jerman et al., 2019; Laborel-Préneron et al., 2017; Volf et al., 2015). En el caso de materiales a base de lino sin aglutinante, los valores de conductividad térmica oscilan entre los 0,4 y 0,8 W/mK. Así mismo, de los cinco tipos de biomasa más estudiados y que no utilizan aglutinante, los valores mínimos más bajos de esta propiedad han sido encontrados para materiales a base de arroz y lino ($\sim 0,04$ W/mK), seguidos de los preparados a base de cáñamo ($\sim 0,051$ W/mK). Si comparamos estos valores con los de las espumas comerciales (ver Tabla 2.8), se puede decir que los obtenidos con lino y arroz son bastante cercanos a los máximos reportados por Hung Anh y Pásztor (2021). Estos valores apoyan el interés reciente del uso de subproductos agrícolas como potenciales bioaislantes en la construcción.

En cuanto a los valores de la conductividad térmica de los biomateriales preparados con aglutinantes (ver Tabla 2.7.), las maderas con UF como ligante presentan menores valores que las muestras unidas con PLA. Entre las biomazas que emplean como aglutinante la resina UF, las maderas presentan los menores valores de conductividad térmica del producto final, seguidas por el lino.

Por otro lado, para los materiales preparados a base de cemento y biomazas (ver Tabla 2.7), se deduce que la unión de estos materiales disminuye significativamente el valor de la conductividad térmica en todos los casos, tomando como referencia el valor de la conductividad térmica del cemento fraguado suele estar en torno a los 0,39 W/mK (Alabduljabbar et al., 2020). En la [Figura 2.6](#) se comparan los valores mínimos promedios obtenidos de los biomateriales a base de cemento. Como se puede observar, la biomasa que más ha minimizado esta propiedad ha sido el cáñamo seguido de las maderas.

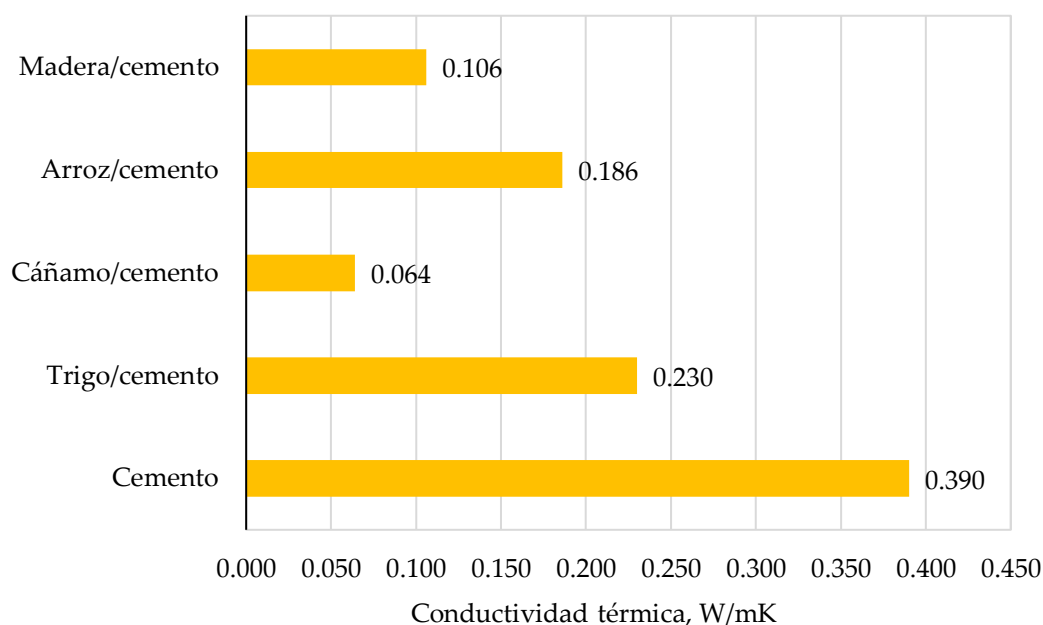


Figura 2.6. Conductividades térmicas mínimas en promedio de los materiales a base de cemento incluidos en la Tabla 2.7.

La conductividad térmica suele estar influenciada por diversos factores (Hung Anh y Pásztor, 2021) como son la densidad y porosidad de las muestras, la temperatura ambiente o el contenido de humedad de las muestras (ver Tabla 2.9). En general, se busca desarrollar materiales de muy bajas densidades (o muy altas porosidades) y bajos contenidos en humedad (Gößwald et al., 2021; Munir et al., 2021; Wei et al., 2015). Así mismo, se suele investigar la dependencia de la conductividad térmica de los factores mencionados (e.g., densidad, porosidad, humedad) variando y modificando, por ejemplo, la configuración de las muestras (tamaño de partícula o fracción de volumen).

Tabla 2.7. Propiedades térmicas y acústicas de algunos materiales bioaislantes.

Aglutinante	Biomasa	Densidad (Kg/m ³)	Conductividad térmica (W/mK)	SAC	NRC	Referencia
Sin aglutinante	Arroz	68-140	0,040-0,194	0,53-0,99	N/E	Kang et al. (2019a) y Sabapathy y Gedurupi (2019)
	Cáñamo	36,2-153	0,051-0,054	0.01- 0,95	N/E	Benardi y Iannace (2017); Chabriac et al. (2016); Jerman et al. (2019); Laborel-Préneron et al. (2017); y Volf et al. (2015)
	Lino	23-500	0,043-0,090	0,5-0,99	N/E	Chabriac et al. (2016); Hajj et al. (2011); Korjenic et al. (2011); Jerman et al. (2019); Mahieu et al. (2019); y Volf et al. (2015)
	Madera	25-894	0,045-0,197	0,05-1,00	0,4	Benardi y Iannace (2017); Casas-Ledón et al. (2020); Çavuş et al. (2019); Christy et al. (2021); Gößwald (2021); Iannace (2017); Kang et al. (2015); Negro et al. (2016); Volf et al. (2015); Wang et al. (2017); y Yeon y Kim (2014)
	Trigo	65,6-104	0,047-0,066	N/M	N/M	Conti et al. (2017); Pavelek et al. (2018); y Volf et al. (2015)
Resina UF	Arroz	300-700	0,099	N/M	N/M	Hussein et al. (2019)
	Lino	300-700	0,066-0,086	N/M	N/M	Hussein et al. (2019) y Mahieu et al. (2019)
	Madera	154,57.965,06	0,048-0,103	0,04-0,85	0,10-0,50	Čulík et al. (2020); Ferrandez-Villena et al. (2020b); Hazrati-Behnagh et al. (Hazrati-Behnagh et al., 2016); Jeon et al. (2021); Kain et al. (2016, 2018, 2020); Park

						et al. (2020); Pásztor et al. (Pásztor et al., 2017) y (Pásztor et al., 2019); Tsalagkas et al. (Tsalagkas et al., 2019); Tudor et al. (2020) y (2021); y Vahnina et al. (2018)
PLA	Lino	313,43-337,75	N/M	0,06-1,37	N/E	Gliscinska et al. (Gliscinska et al., 2016) y (2021)
	Madera	1248-1274	0,231-0,358	N/M	N/M	Kamau-Devers et al. (2019)
Cemento	Arroz	N/E	0,160-0,301	máximo 0,76	0,17-0,36	Intaboot (2020) y Pacha et al. (2021)
	Cáñamo	233,03-1922,49	0,058-0,476	0,24-0,9	0,2-0,4	Cigasova et al. (Cigasova et al., 2015); Cismaru et al. (2015); Dhakal et al. (2017); Somé et al. (2018); Fernea et al. (2019); Florea y Manea (Florea y Manea, 2019); Fernea et al. (2017a); Kinnane et al. (2016); Park et al. (2019); Pisello et al. (2016); y Nemeč et al. (2019)
	Madera	660-984,31	0,074-0,239	0,20-0,93	N/E	Nemeč et al. (2019); Park et al. (2019); y Pisello et al. (2016)
	Trigo	736-1619	0,160-0,608	0,075-0,67	N/E	Petrella et al. (Petrella et al., 2018) y Ashour et al. (2015)

Abreviaturas: N/M: No medido; N/E: No especificado, UR: Urea-Formaldehido

Tabla 2.8. Propiedades de algunos materiales aislantes comerciales.

Material aislante	Densidad (Kg/m ³)	Conductividad térmica (W/mK)
Fibra de vidrio	24–112	0,033–0,040
Poliestireno expandido (EPS)	15–35	0,035–0,040
Poliestireno extruido (XPS)	25–45	0,030–0,040
Poliuretano (PUR)	30–100	0,024–0,030

Fuente: Hung Anh y Pásztor (2021).

Tabla 2.9. Factores analizados que influyen en la conductividad térmica (λ).

Factor	Efectos	Referencias
Densidad (ρ)	λ disminuye al disminuir ρ	Gößwald et al. (2021) y Wei et al. (2015)
Espesor de la muestra (e)	λ disminuye al disminuir e	Zach et al. (2012)
Fracción de volumen de las partículas (V_f)	λ disminuye al aumentar V_f	Pedreño et al. (2017)
Humedad/contenido de agua (H)	λ aumenta linealmente con H	Gaujena et al. (2020); Gößwald et al. (2021); Goularly et al. (2017); Nguyen et al. (2017); y Vitale et al. (2021)
Porosidad/contenido de aire (P)	λ disminuye al aumentar P	Munir et al. (2021)
Temperatura ambiente (T)	λ aumenta al aumentar T	Wei et al. (2015)

Para la determinación de las propiedades térmicas, se pueden emplear diferentes procedimientos experimentales: métodos en condiciones de estado estacionario y métodos en condiciones transitorias (Palacios et al., 2019). Entre los métodos en condiciones de estado estacionario más comunes está el conocido como “método del plato caliente” (Pásztor et al., 2021), que ha sido usado por Braiek et al. (2017), El Azhary et al. (2017) o D’Alessandro et al. (2017), y que consiste en colocar la muestra sólida entre dos placas paralelas de temperatura controlada, una de las cuales será una placa caliente, calentada mediante una resistencia. Esta configuración se encuentra aislada térmicamente para evitar pérdidas de calor y lograr una dirección de transferencia de calor uniaxial. Cuando se alcanza el estado estacionario, la conductividad térmica se puede determinar mediante la ecuación de Fourier (Palacios et al., 2019).

Entre de los métodos en condiciones transitorias, se encuentran el método del hilo caliente transitorio (Song et al., 2013) y el método de la fuente plana transitoria (TPS) (Liuzzi et al., 2020a). El primero suele utilizarse para medir la conductividad térmica de materiales no conductores de la electricidad (Palacios et al., 2019), y el segundo para medir muestras en estado sólido, líquido y en polvo (Palacios et al., 2019). Ejemplos de trabajos incluidos en esta revisión que han utilizado el método TPS para determinar la

conductividad térmica son el de Hassan et al. (2020) o el de Sabapathy y Gedupudi (2019). Muñoz et al. (2019) observaron en sus investigaciones discrepancias con estudios anteriores en términos de los valores absolutos de la conductividad térmica y propiedades mecánicas, indicando que estas propiedades son muy sensibles a las materias primas y a los procedimientos de obtención empleados, así como al método de medición utilizado para determinarla.

En cuanto a las propiedades acústicas analizadas, las más estudiadas son el *coeficiente de absorción acústica* (SAC) y el *coeficiente de reducción de ruido* (NRC), estudiadas por el 87,36% y el 20,33% de los artículos que han analizado las propiedades acústicas respectivamente. La primera, que suele dar información sobre la eficacia acústica de un material (Carrascal García et al., 2016; Casas-Ledón et al., 2020), resulta indispensable para el diseño y la simulación acústica del campo sonoro en recintos; mientras que el SAC es distinto para cada frecuencia y viene dado normalmente en bandas de ancho de una octava con frecuencias centrales de 125 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2k Hz y 4 kHz o tercios de octava (Carrascal García et al., 2016). Normalmente, en los materiales absorbentes acústicos se buscan elevados valores del SAC y del NRC (ya que el NRC se determina a partir de los valores del SAC a ciertas frecuencias). Para el SAC, dentro del grupo de materiales preparados sin aglutinantes se han obtenido valores máximos cercanos a 0,99 para el arroz, lino y madera de álamo y el valor mínimo más alto reportado ha sido de 0,60 para las maderas de álamo y abeto. De los artículos considerados en la Tabla 2.7, solo se ha reportado un valor para el NRC de 0,4 para maderas de especies sin especificar (Yeon y Kim, 2014). Para los materiales a base de resina UF, los valores máximos del SAC (0,85) y del NRC (~0,5) se han obtenido en aquellos materiales preparados con partículas o fibras de madera de alerce y con aquellas en las que no se especifica la especie. Con PLA y partículas de lino se han obtenido valores del SAC cercanos a 1,37.

Finalmente, la Tabla 2.7. muestra que los materiales basados en cemento y cáñamo presentan valores máximos de SAC (0,9) y NRC (0,4). En general, a excepción del caso del PLA y el lino (1,37), los valores máximos de SAC son bastante similares entre los diferentes materiales ya que casi todos rondan los 0,9. El valor del NRC más alto obtenido de los indicados corresponde a los paneles de resina UF y partículas de alerce. Este valor máximo reportado para el SAC (0,9) es bastante similar a los obtenidos con absorbentes artificiales comerciales (Ravandi et al., 2015).

Algunos factores que pueden influir en el rendimiento acústico de los materiales bioaislantes (ver Tabla 2.10) son el tamaño de partícula de la biomasa (Glé et al., 2013; Gomez et al., 2020a), la resistividad del flujo de aire (Taban et al., 2020c), la porosidad (Dos Santos Siqueira et al., 2021), la tortuosidad (Chabriac et al., 2016), el espesor de la

muestra (Fouladi et al., 2012), la densidad (Dunne et al., 2017; Oancea et al., 2018) o el grado de compactación (Koizumi et al., 2002; Samsudin et al., 2016; Seddeq, 2009), o la rugosidad del material (Guna, Ilangovan, et al., 2021; Guna, Yadav, et al., 2021; Kinsler et al., 2006).

Tabla 2.10. Factores analizados que influyen en la capacidad de absorción acústica (SAC).

Factor	Efectos	Referencias
Densidad (ρ)	SAC aumenta al disminuir r y se desplaza a mayores frecuencias	Oancea et al. (2018) y Dunne et al. (2017)
Diámetro fibra/tamaño de partícula (ϕ)	SAC aumenta al disminuir ϕ	Gomez et al. (2020a) y Glé et al. (2013)
Espesor de la muestra (e)	SAC aumenta al incrementar e	Carrión (1998)
Fracción de volumen de las partículas (V_f)	α aumenta al aumentar V_f	Pedreño-Rojas et al. (2017)
Humedad/contenido de agua (H)	SAC no se ve afectada significativamente	D'Alessandro et al. (2018) y Gourlay et al. (2017)
Porosidad/contenido de aire (P)	SAC disminuye al disminuir la P abierta	Siquiera et al. (2021)

De los 356 artículos incluidos en esta revisión de literatura, 77 han analizado simultáneamente las propiedades térmicas y acústicas (e.g., Bertolini et al., 2019; Binici et al., 2016; Degrave-Lemeurs et al., 2018; Gourlay et al., 2017; Lahouioui et al., 2020; Lenormand et al., 2017; Mati-Baouche et al., 2014; Taban et al., 2020b). Según estos artículos, la conductividad térmica y el coeficiente de absorción acústica no siguen patrones de variación similares, y tampoco parecen depender de la misma manera de los factores considerados durante la preparación de las muestras (e.g., cantidad de biomasa). Por ejemplo, Intaboot (2020) observó que, a medida que la cantidad de fibras en el material cementoso aumentaba, la conductividad térmica de las muestras disminuía, mientras que la absorción del sonido aumentaba, sobre todo a frecuencias elevadas. Otro ejemplo, es el artículo publicado por Georgescu y Cosereanu (2018), quienes estudiaron materiales compuestos a base de fibras de madera, y encontraron que una mayor proporción de fibras en el producto final disminuía el rendimiento térmico de los compuestos, pero mejoraba el rendimiento acústico del compuesto. La humedad, por ejemplo, es un factor que no suele afectar significativamente a la absorción acústica (Gourlay et al., 2017), pero que sí influye bastante en la conductividad térmica (Gaujena et al., 2020; Gößwald et al., 2021; Nguyen et al., 2017).

Las propiedades acústicas se suelen determinar mediante un tubo de impedancia siguiendo el método de la función de transferencia de dos micrófonos descrito en la norma UNE-EN-ISO 10534-2:2002 (ISO, 1998) (de Carvalho et al., 2020; Or et al., 2017; Taban et al., 2019). A partir de la medición de la absorción acústica en el tubo de

impedancia, además de obtener el SAC, se puede obtener el NRC y el coeficiente de absorción sonora ponderado: α_w (ISO, 1997).

Además de estas características térmicas y acústicas, los investigadores han evaluado otras propiedades que suelen ser también deseables para optimizar el rendimiento del material para su aplicación como aislantes en la construcción:

- **Densidad aparente.** Densidad del material poroso en su conjunto, masa total del material poroso por unidad de volumen (Dunne et al., 2017). Este parámetro, que suele influir significativamente sobre las propiedades térmicas y acústicas de los bioaislantes (Egab et al., 2014; Hung Anh y Pásztor, 2021), depende en gran medida de la tensión de compactación aplicada durante su preparación (Viel et al., 2020).
- **Porosidad.** Cantidad y distribución de espacios vacíos en la estructura de un material (Dunne et al., 2017; Egab et al., 2014). Los poros atrapan aire, lo que mejora la capacidad del material para aislar térmica (Karaky et al., 2018) y acústicamente (Chabriac et al., 2016), y puede influir en la retención de humedad, un factor importante en la eficacia a largo plazo del aislante (Karaky et al., 2018).
- **Tortuosidad.** Parámetro estructural adimensional que informa de cómo influye la estructura interna de los poros en la velocidad macroscópica del flujo de fluidos a través de un material (Maderuelo-Sanz et al., 2013). En concreto, tiene un impacto directo en la resistividad del flujo de aire y, por lo tanto, influye directamente en la absorción acústica del material poroso (Joshi et al., 2011). Normalmente, una mayor tortuosidad tiende a mejorar de absorción acústica de los bioaislantes (Buratti et al., 2018; Taban et al., 2020c).
- **Propiedades mecánicas.** Aquellas que caracterizan la capacidad de los materiales para cargas de diversa naturaleza (e.g., tracción, compresión, flexión, torsión o cizalladura). Se obtienen a partir de los ensayos mecánicos regulados por normas y estandarizaciones. Para caracterizar la resistencia a flexión de los bioaislantes, se suele determinar el módulo de elasticidad en flexión (conocido como MOE, por sus siglas en inglés: *Modulus of elasticity*) y la resistencia a la flexión (denotada como MOR, por sus siglas en inglés: *Modulus of rupture*) (Ghofrani et al., 2017; Hussein et al., 2019). También se determina la resistencia a la compresión (Karaky et al., 2019), el módulo dinámico de elasticidad (Sampathrajan et al., 1991), el módulo de Young (Elsacker et al., 2019), el alargamiento a la rotura (Huda y Yang, 2009) o la resistencia al impacto (Huda y Yang, 2009). Por lo general, los materiales compuestos basados en biomasa, yeso o cemento tienden a tener una menor resistencia mecánica y una mayor

flexibilidad en comparación con los materiales en condición original (Salas-Ruiz y Barbero-Barrera, 2019; Vitale et al., 2021).

- **Resistencia a la humedad.** Debido a su elevada porosidad, los materiales porosos pueden absorber grandes cantidades de humedad en condiciones de humedad elevada (Hung Anh y Pásztor, 2021). Para cuantificar el nivel de humedad retenido en los materiales o la capacidad de estos para absorber la humedad o el agua se utilizan diversos parámetros, como la humedad relativa (Belakroum et al., 2017), el espesor de hinchamiento (Kremensas et al., 2019; Sassoni et al., 2014), la absorción de agua (Kremensas et al., 2019), la absorción de humedad (Liu et al., 2019) y el contenido de humedad (Ostendorf et al., 2021). Si la muestra es altamente higroscópica y retiene una gran cantidad de agua, la conductividad térmica, por ejemplo, puede verse modificada e incluso aumentar (Gaujena et al., 2020; Gößwald et al., 2021; Gourlay et al., 2017; Nguyen et al., 2017; Vitale et al., 2021).
- **Propiedades de inflamabilidad.** Caracterizan la capacidad de los materiales para resistir el fuego y mantener su integridad estructural durante un período determinado (Lautenberger et al., 2022). Entre estas propiedades, se han estudiado la velocidad de propagación de la llama (Fatima y Mohanty, 2011), la inflamabilidad con ayuda de un medidor de inflamabilidad (Fatima y Mohanty, 2011; Ferrandez-Villena et al., 2020a) y la resistencia a la llama según el método de ensayo estándar (Guna et al., 2019). La capacidad de un elemento constructivo para mantener su integridad estructural y evitar la propagación del fuego se clasifica en diferentes niveles mediante la normativa europea EN 13501-1 + A1 (2009).

2.4. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

A pesar de que el uso de bioaislantes tiene sus raíces en la antigüedad (e.g., adobe), la creciente búsqueda de materiales aislantes más sostenibles y con una menor huella de carbono, la promoción de la economía circular y la reducción de la dependencia de recursos finitos han impulsado el interés por las propiedades aislantes de estos materiales, especialmente a partir de 2014, dando lugar a una rica y dispersa literatura, lo cual nos llevó a sistematizar y cartografiar el conocimiento existente sobre el tema.

La revisión sistemática de los 354 trabajos relacionados con el uso de biomásas de origen vegetal en la preparación de materiales aislantes térmicos y acústicos dirigidos a su uso en la construcción nos ha permitido detectar que hay algunas biomásas que han

sido abundantemente estudiadas, como la madera, el cáñamo y el arroz. Sin embargo, otras biomásas, que poseen un buen potencial para el aislamiento térmico y acústico, como el esparto (Arenas et al., 2020), la paja de avena (Bakatovich et al., 2018), las pieles de mandarina (Kang et al., 2019b), la pulpa de la remolacha azucarera (Karaky et al., 2019) o el jacinto de agua (Salas-Ruiz et al., 2019), han sido poco estudiadas. Esta laguna en la investigación no sólo constituye una motivación para la realización de esta investigación, sino que además nos lleva a unirnos otros autores en su llamada a más investigación sobre las propiedades aislantes de los tallos de jacinto de agua (Salas et al., 2019) y, la paja de avena y el centeno (Bakatovich et al., 2018), respectivamente. Estas biomásas son muy abundantes en la naturaleza y, en ocasiones su gestión y eliminación constituyen un problema social, medioambiental o económico; razón por la que sería de suma importancia incorporarlas a la cadena de valor.

Nuestra revisión sistemática de la literatura también revela que existen pocos trabajos que realicen un diseño estadístico (Aladejana et al., 2020; Doost-Hoseini et al., 2014) para la optimización de las variables de preparación de muestras. Un mayor número de este tipo de estudios ayudaría a determinar las condiciones óptimas y el modelo predictivo para la producción materiales aislantes basados en biomásas con el mejor rendimiento, y además ayudaría a la comunidad científica a tener una referencia fiable con la que comparar sus resultados. Para contribuir a completar esta laguna en la investigación de las propiedades térmicas y acústicas de las biomásas vegetales, animamos a la comunidad científica a diseñar dichos experimentos, que permitan demostrar estadísticamente sus propiedades. Esto ayudaría a encontrar las mejores combinaciones de procesos-estructura-propiedades de los materiales.

Por otro lado, la revisión sistemática llevada a cabo revela que, salvo excepciones (Elsacker et al., 2019; Liuzzi et al., 2017), hay pocos estudios sobre la durabilidad a largo plazo de las biomásas menos estudiadas, a pesar de que algunas de ellas, como el jacinto de agua o la paja de avena, son muy abundantes. Si bien, existen trabajos que analizan la durabilidad de las propiedades térmicas de los materiales basados en biomásas, se ha detectado la ausencia de trabajos que analicen la variabilidad de las propiedades acústicas en el tiempo. Por tanto, sería conveniente realizar estudios que evalúen también el desempeño de estos materiales a largo plazo como absorbentes acústicos en diferentes condiciones ambientales. Esto ayudaría a comprender mejor su resistencia al envejecimiento, a la humedad, al cambio de temperatura u a otros factores que pudieran afectar su rendimiento a lo largo del tiempo.

Además, nuestra revisión corrobora la necesidad de estudios que evalúen la rentabilidad y el impacto económico de la utilización de materiales basados en biomasa

en el aislamiento de edificios y construcciones en general; una necesidad que ya había sido puesta de manifiesto por Liu et al. (2017b) y Gil-Lopez et al. (2017) y que, por tanto, animamos a abordar a las futuras investigaciones. Asimismo, se han detectado pocos estudios (D'Alessandro et al., 2017; Kumar et al., 2020; Usubharatana y Phungrassami, 2019) centrados en evaluar específicamente la eficiencia energética de estos materiales, tanto a corto como a largo plazo, en términos tanto de ahorro de energía como de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Alentamos, por tanto, a la comunidad científica a investigar la eficiencia energética de los materiales basados en biomásas de origen vegetal en la construcción.

Por último, animamos a aplicar los materiales bioaislantes en nuevos campos y sectores, más allá de la construcción, tales como el de la automoción y la industria.

2.5. CONCLUSIONES

La presente revisión sistemática de la literatura sobre las propiedades aislantes de los materiales contribuye a la literatura de varias formas. *Primero*, este es el primer trabajo en sistematizar, integrar y examinar de forma crítica el cuerpo de conocimiento existente sobre las propiedades térmicas y acústicas de los biomateriales. La compilación y análisis del conocimiento existente es especialmente importante si tenemos en cuenta que la literatura sobre el tema no sólo es rica y abundante, sino que además está enormemente dispersa, como revela el hecho de que los artículos incluidos en esta revisión sistemática de la literatura se hayan publicado en más de un centenar de revistas, y de que casi un tercio de ellas hayan publicado tan sólo un artículo sobre el tema.

Segundo, dado que los principales objetivos de cualquier revisión sistemática de la literatura son sistematizar el conocimiento existente sobre el tema y ofrecer o proponer futuras líneas de investigación (Ge y Campopiano, 2022), la revisión que se presenta en este capítulo contribuye a la literatura identificando varias lagunas en la investigación y proponiendo una agenda de investigación futura que permita ampliar nuestro conocimiento sobre el uso de materiales basados en biomásas de origen vegetal en la preparación de bioaislantes térmicos y fonoabsorbentes con potencial aplicación en la industria de la construcción.

A pesar de estas contribuciones, la presente investigación no está exenta de limitaciones. La primera de ellas es que la búsqueda de literatura se limitó a artículos

publicados en inglés incluidos en la WoS. Aunque la búsqueda en WoS como única base de datos es común en la literatura (e.g., Huang et al., 2022; Silvestri et al., 2021; Wang et al., 2018; Ying et al., 2023; Zheng et al., 2021) porque permite identificar la literatura más relevante sobre cualquier tema, los autores reconocen que haber buscado en otras bases de datos como *Scopus* (Abdelaal et al., 2023; Ricciardi et al., 2020), *Science Direct* (L. Liu et al., 2017a), *Google Scholar* (Abdelaal et al., 2023; Ricciardi et al., 2020), *ProQuest* (Abdelaal et al., 2023), o *Springer* (Vanegas Pérez et al., 2017) podría haber conducido a diferentes resultados. Igualmente, la búsqueda se limitó a artículos publicados en inglés, y, por tanto, la inclusión en la revisión otro tipo de documentos (por ejemplo, libros, capítulos de libros o actas de congresos) o publicados en otros idiomas, también podrían haber conducido a otros resultados. Por tanto, llamamos a replicar y ampliar esta revisión con estudios publicados en otros idiomas y en otros formatos. Otra de las limitaciones es que toda la información de los trabajos fue compilada de forma manual, y por tanto no se pueden descartar errores humanos (Hernández Linares y Arias-Abelaira, 2022).

A pesar de estas limitaciones, esperamos que la revisión sistemática de la literatura aquí presentada constituya un impulso para que el campo pueda seguir creciendo de forma sólida en el futuro.

REFERENCIAS

Los artículos marcados con * son aquellos que han sido considerados en la revisión sistemática de la literatura.

- *Aamr-Daya, E., Langlet, T., Benazzouk, A., y Quéneudec, M. (2008). Feasibility study of lightweight cement composite containing flax by-product particles: Physico-mechanical properties. *Cement and Concrete Composites*, 30(10), 957-963. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.06.002>
- Abdelaal, A., Benedetti, V., Villot, A., Patuzzi, F., Gerente, C., y Baratieri, M. (2023). Innovative pathways for the valorization of biomass gasification char: A systematic review. *Energies*, 16(10), 4175. <https://doi.org/10.3390/en16104175>
- *Abu-Jdayil, B., Barkhad, M. S., Mourad, A.-H. I., y Iqbal, M. Z. (2021). Date palm wood waste-based composites for green thermal insulation boards. *Journal of Building Engineering*, 43, 103224. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103224>
- *Adamopoulos, S., Foti, D., Voulgaridis, E., y Passialis, C. (2015). Manufacturing and

properties of gypsum-based products with recovered wood and rubber materials. *Bioresources*, 10(3), 5573-5585.

- *Ahmad, M. R., Chen, B., Yousefi Oderji, S., y Mohsan, M. (2018). Development of a new bio-composite for building insulation and structural purpose using corn stalk and magnesium phosphate cement. *Energy and Buildings*, 173, 719-733. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.06.007>
- *Ahmadi, R., Souri, B., y Ebrahimi, M. (2020). Evaluation of wheat straw to insulate fired clay hollow bricks as a construction material. *Journal of Cleaner Production*, 254, 120043. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120043>
- *Aigbomian, E. P., y Fan, M. (2013). Development of wood-crete building materials from sawdust and waste paper. *Construction and Building Materials*, 40, 361-366. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.018>
- *Aisenbrey, N., y Frommann, L. (2010). Manufacturing and features of acoustically optimized natural fibre reinforced plastics. En Dimitriou, E., y Petralia, M. (Eds.), *Ceramic and Polymer Matrix Composites. Properties, Performance and Applications* (pp. 51-85), Nova Science Publishers, Inc., Nueva York.
- *Alabduljabbar, H., Huseien, G. F., Sam, A. R. M., Alyouef, R., Algaifi, H. A., y Alaskar, A. (2020). Engineering properties of waste sawdust-based lightweight alkali-activated concrete: Experimental assessment and numerical prediction. *Materials*, 13(23), 5490. <https://doi.org/10.3390/ma13235490>
- Aladejana, J. T., Wu, Z., Fan, M., y Xie, Y. (2020). Key advances in development of straw fibre bio-composite boards: An overview. *Materials Research Express*, 7(1), 012005. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab66ec>
- *Alavez-Ramirez, R., Chiñas-Castillo, F., Morales-Dominguez, V., Ortiz-Guzman, M., y Lara-Romero, J. (2014). Thermal lag and decrement factor of a coconut-ferrocement roofing system. *Construction and Building Materials*, 55, 246-256. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.048>
- Alderson, P., S, G., y Higgins, J. (Eds.). (2004). *Cochrane Reviewers' Handbook 4.2.2*. Wiley & Sons, Ltd.
- *Ali, M., Alabdulkarem, A., Nuhait, A., Al-Salem, K., Almuzaiqer, R., Bayaquob, O., Salah, H., Alsaggaf, A., y Algafri, Z. (2020). Thermal analyses of loose agave, wheat straw fibers and agave/wheat straw as new hybrid thermal insulating materials for

- buildings. *Journal of Natural Fibers*, 18(12), 2173-2188. <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1724232>
- *Ali, M., Alabdulkarem, A., Nuhait, A., Al-Salem, K., Iannace, G., y Almuzaiqer, R. (2021). Characteristics of agro waste fibers as new thermal insulation and sound absorbing materials: Hybrid of date palm tree leaves and wheat straw fibers. *Journal of Natural Fibers*, 19(13), 6576-6594, <https://doi.org/10.1080/15440478.2021.1929647>
- *Almalkawi, A. T., Soroushian, P., y Shrestha, S. S. (2019). Evaluation of the energy-efficiency of an aerated slurry-infiltrated mesh building system with biomass-based insulation. *Renewable Energy*, 133, 797-806. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.10.006>
- *Almeida, R., Simões, N., Tadeu, A., Palha, P., y Almeida, J. (2019). Thermal behaviour of a green roof containing insulation cork board. An experimental characterization using a bioclimatic chamber. *Building and Environment*, 160, 106179. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106179>
- *Amel, L., Abdellatif, Z., y Daniel, Q. (2016). Determination of acoustic parameters of bio-based materials distended for building: Application case to Aleppo pine wood cork and their composites. *Wood Research*, 61(1), 25-33.
- *António, J., Tadeu, A., Marques, B., Almeida, J. A. S., y Pinto, V. (2018). Application of rice husk in the development of new composite boards. *Construction and Building Materials*, 176, 432-439. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.028>
- *Antunes, A., Faria, P., Silva, V., y Brás, A. (2019). Rice husk-earth based composites: A novel bio-based panel for buildings refurbishment. *Construction and Building Materials*, 221, 99-108. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.074>
- *Arenas, J. P., del Rey, R., Alba, J., y Oltra, R. (2020). Sound-absorption properties of materials made of esparto grass fibers. *Sustainability*, 12(14), 5533. <https://doi.org/10.3390/su12145533>
- Arnaud, L., y Gourlay, E. (2012). Experimental study of parameters influencing mechanical properties of hemp concretes. *Construction and Building Materials*, 28(1), 50-56. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.052>
- Arora, N. K. (2018). Environmental sustainability necessary for survival. *Environmental Sustainability*, 1(1), 1-2. <https://doi.org/10.1007/s42398-018-0013-3>
- Arrigoni, A., Pelosato, R., Melià, P., Ruggieri, G., Sabbadini, S., y Dotelli, G. (2017). Life

- cycle assessment of natural building materials: The role of carbonation, mix-ture components and transport in the environmental impacts of hempcrete blocks. *Journal of Cleaner Production*, 149, 1051-1061. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.161>
- Asdrubali, F., D'Alessandro, F., y Schiavoni, S. (2015). A review of unconventional sustainable building insulation materials. *Sustainable Materials and Technologies*, 4, 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2015.05.002>
- Asdrubali, F., Ferracuti, B., Lombardi, L., Guattari, C., Evangelisti, L., y Grazieschi, G. (2017). A review of structural, thermo-physical, acoustical, and environmental properties of wooden materials for building applications. *Building and Environment*, 114, 307-332. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.12.033>
- *Asdrubali, F., Pisello, A. L., D'Alessandro, F., Bianchi, F., Fabiani, C., Cornicchia, M., y Rotili, A. (2016). Experimental and numerical characterization of innovative cardboard based panels: Thermal and acoustic performance analysis and life cycle assessment. *Building and Environment*, 95, 145-159. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.09.003>
- *Ashour, T., Korjenic, A., Korjenic, S., y Wu, W. (2015). Thermal conductivity of unfired earth bricks reinforced by agricultural wastes with cement and gypsum. *Energy and Buildings*, 104, 139-146. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.016>
- *Babenko, M., Estokova, A., Savytskyi, M., y Unčík, S. (2018). Study of thermal properties of lightweight insulation made of flax straw. *Slovak Journal of Civil Engineering*, 26(2), 9-14. <https://doi.org/10.2478/sjce-2018-0008>
- *Badagliacco, D., Sanfilippo, C., Megna, B., La Mantia, T., y Valenza, A. (2021). Mechanical and thermal properties of insulating sustainable mortars with *ampelodesmos mauritanicus* and *pennisetum setaceum* plants as aggregates. *Applied Sciences*, 11(13), 5910. <https://doi.org/10.3390/app11135910>
- *Badouard, C., Bogard, F., Bliard, C., Lachi, M., Abbes, B., y Polidori, G. (2021). Development and characterization of viticulture by-products for building applications. *Construction and Building Materials*, 302, 124142. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124142>
- *Baharudin, E., Ismail, A., Alhawari, A. R. H., Zainudin, E. S., Majid, D. L. A. A., y Seman, F. C. (2017). Investigate of wave absorption performance for oil palm frond and empty fruit bunch at 5.8 GHz. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 9(3S), 335-

348. <https://doi.org/10.4314/jfas.v9i3s.27>
- *Bakatovich, A., Davydenko, N., y Gaspar, F. (2018). Thermal insulating plates produced on the basis of vegetable agricultural waste. *Energy and Buildings*, 180, 72-82. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.09.032>
- *Bakatovich, A., y Gaspar, F. (2019). Composite material for thermal insulation based on moss raw material. *Construction and Building Materials*, 228. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116699>
- Baldinelli, G., Bianchi, F., Gendelis, S., Jakovics, A., Morini, G. L., Falcioni, S., Fantucci, S., Serra, V., Navacerrada, M. A., Díaz, C., Libbra, A., Muscio, A., y Asdrubali, F. (2019). Thermal conductivity measurement of insulating innovative building materials by hot plate and heat flow meter devices: A Round Robin Test. *International Journal of Thermal Sciences*, 139, 25-35. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2019.01.037>
- *Balo, F., y Sua, L. S. (2018). Techno-economic optimization model for “sustainable” insulation material developed for energy efficiency. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 15(3), 792-814. <https://doi.org/10.1111/ijac.12855>
- *Bánhidi, V., y Gömze, L. A. (2008). Improvement of insulation properties of conventional brick products. *Materials Science Forum*, 589, 1-6. <https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/MSF.589.1>
- *Bansod, P. V., Mittal, T., y Mohanty, A. R. (2016). Study on the acoustical properties of natural jute material by theoretical and experimental methods for building acoustics applications. *Acoustics Australia*, 44(3), 457-472. <https://doi.org/10.1007/s40857-016-0073-4>
- *Barbero-Barrera, M. M., Salas-Ruíz, A., y Galbis-Morales, R. (2021). Mechanical and physical characterisation of typha domingensis-based thermal insulation boards for developing areas such as nigeria. *Waste and Biomass Valorization*, 12(10), 5795-5806. <https://doi.org/10.1007/s12649-021-01410-4>
- *Barreca, F., y Fichera, C. R. (2013b). Use of olive stone as an additive in cement lime mortar to improve thermal insulation. *Energy and Buildings*, 62, 507-513. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.03.040>
- *Barreca, F., y Fichera, C. R. (2016). Thermal insulation performance assessment of agglomerated cork boards. *Wood and fiber science*, 48(2), 96-103.

<https://www.researchgate.net/publication/303737155>

- *Barreca, F., Fichera, C. R., Rastilantie, M., y Fichera, C. R. (2013a). Wall panels of *Arundo donax* L. for environmentally sustainable agriculture buildings: Thermal performance evaluation. *Agriculture y Environment*, 11(2), 1353-1357. <https://www.researchgate.net/publication/270449330>
- *Barreca, F., Martinez Gabarron, A., Flores Yepes, J. A., y Pastor Pérez, J. J. (2018). Innovative use of giant reed and cork residues for panels of buildings in Mediterranean area. *Resources, Conservation and Recycling*, 140, 259-266. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.10.005>
- *Barreca, F., y Tirella, V. (2017). A self-built shelter in wood and agglomerated cork panels for temporary use in Mediterranean climate areas. *Energy and Buildings*, 142, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.003>
- *Batouli, S. M., Zhu, Y., Nar, M., y D'Souza, N. A. (2014). Environmental performance of kenaf-fiber reinforced polyurethane: A life cycle assessment approach. *Journal of Cleaner Production*, 66, 164-173. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.064>
- Bastos, R. G. (2018). Biofuels from microalgae: Bioethanol. En Jacob-Lopes, E., Queiroz Zepka, L., y Queiroz, M. (Eds.), *Green Energy and Technology* (pp. 229-246). Springer Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-319-69093-3_11
- *Beheshti, M. H., Khavanin, A., Safari Varyani, A., Yahya, M. N. Bin, Alami, A., Khajenasiri, F., y Talebitooti, R. (2021). Improving the sound absorption of natural waste material-based sound absorbers using micro-perforated plates. *Journal of Natural Fibers*, 19(13), 5199-5210. <https://doi.org/10.1080/15440478.2021.1875364>
- *Belakroum, R., Gherfi, A., Bouchema, K., Gharbi, A., Kerboua, Y., Kadja, M., Maalouf, C., Mai, T. H., El Wakil, N., y Lachi, M. (2017). Hygric buffer and acoustic absorption of new building insulation materials based on date palm fibers. *Journal of Building Engineering*, 12, 132-139. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2017.05.011>
- *Belakroum, R., Gherfi, A., Kadja, M., Maalouf, C., Lachi, M., El Wakil, N., y Mai, T. H. (2018). Design and properties of a new sustainable construction material based on date palm fibers and lime. *Construction and Building Materials*, 184, 330-343. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.196>
- *Benaniba, S., Driss, Z., Djendel, M., Raouache, E., y Boubaaya, R. (2020). Thermo-mechanical characterization of a bio-composite mortar reinforced with date palm

- fiber. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 15, 1-9. <https://doi.org/10.1177/1558925020948234>
- *Berardi, U., y Iannace, G. (2015). Acoustic characterization of natural fibers for sound absorption applications. *Building and Environment*, 94, 840-852. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.05.029>
- *Berardi, U., y Iannace, G. (2017). Predicting the sound absorption of natural materials: Best-fit inverse laws for the acoustic impedance and the propagation constant. *Applied Acoustics*, 115, 131-138. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.08.012>
- *Bertolini, M. da S., de Morais, C. A. G., Christoforo, A. L., Bertoli, S. R., dos Santos, W. N., y Lahr, F. F. A. R. (2019). Acoustic absorption and thermal insulation of wood panels: Influence of porosity. *BioResources*, 14(2), 3746-3757.
- *Bessa, J., Mota, C., Cunha, F., Merino, F., y Figueiro, R. (2017). Multi-layer structures with thermal and acoustic properties for building rehabilitation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 254(4), 042006. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/254/4/042006>
- *Binici, H., Aksogan, O., Bodur, M. N., Akca, E., y Kapur, S. (2007). Thermal isolation and mechanical properties of fibre reinforced mud bricks as wall materials. *Construction and Building Materials*, 21(4), 901-906. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.11.004>
- *Binici, H., Aksogan, O., y Demirhan, C. (2016). Mechanical, thermal and acoustical characterizations of an insulation composite made of bio-based materials. *Sustainable Cities and Society*, 20, 17-26. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.09.004>
- *Borges, J. K., Pacheco, F., Tutikian, B., y de Oliveira, M. F. (2018). An experimental study on the use of waste aggregate for acoustic attenuation: EVA and rice husk composites for impact noise reduction. *Construction and Building Materials*, 161, 501-508. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.078>
- *Bories, C., Aouba, L., Vedrenne, E., y Vilarem, G. (2015). Fired clay bricks using agricultural biomass wastes: Study and characterization. *Construction and Building Materials*, 91, 158-163. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.006>
- *Bories, C., Vedrenne, E., Paulhe-Massol, A., Vilarem, G., y Sablayrolles, C. (2016). Development of porous fired clay bricks with bio-based additives: Study of the environmental impacts by life cycle assessment (LCA). *Construction and Building*

- Materials*, 125, 1142-1151. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.042>
- *Boubel, A., Garoum, M., Bousshine, S., y Bybi, A. (2021). Investigation of loose wood chips and sawdust as alternative sustainable sound absorber materials. *Applied Acoustics*, 172, 107639. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107639>
- *Braiek, A., Karkri, M., Adili, A., Ibos, L., y Ben Nasrallah, S. (2017). Estimation of the thermophysical properties of date palm fibers/gypsum composite for use as insulating materials in building. *Energy and Buildings*, 140, 268-279. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.02.001>
- *Brás, A., Antunes, A., Laborel-Préneron, A., Ralegaonkar, R., Shaw, A., Riley, M., y Faria, P. (2019). Optimisation of bio-based building materials using image analysis method. *Construction and Building Materials*, 223, 544-553. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.148>
- *Bratu, M., Ropotă, I., Vasile, O., Dumitrescu, O., y Muntean, M. (2011). Research on the absorbing properties of some new types of composite materials. *Romanian Journal of Materials*, 41(2), 147-154.
- *Brouard, Y., Belayachi, N., Hoxha, D., Ranganathan, N., y Méo, S. (2018). Mechanical and hygrothermal behavior of clay – Sunflower (*Helianthus annuus*) and rape straw (*Brassica napus*) plaster bio-composites for building insulation. *Construction and Building Materials*, 161, 196-207. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.140>
- *Bujoreanu, C., Nedeff, F., Benchea, M., y Agop, M. (2017). Experimental and theoretical considerations on sound absorption performance of waste materials including the effect of backing plates. *Applied Acoustics*, 119, 88-93. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.12.010>
- *Buratti, C., Belloni, E., Lascaro, E., Merli, F., y Ricciardi, P. (2018). Rice husk panels for building applications: Thermal, acoustic and environmental characterization and comparison with other innovative recycled waste materials. *Construction and Building Materials*, 171, 338-349. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.089>
- Callister Jr, W.D., y Rethwisch, D.G. (2018). *Materials science and engineering: An introduction*. 10th ed., John Wiley & Sons.
- *Carvalho, S. T. M., Mendesa, L. M., Da Silva Cesar, A. A., Flórez, J. B., y Mori, F. A. (2015). Acoustic characterization of sugarcane bagasse particleboard panels

- (*Saccharum officinarum* L). *Materials Research*, 18(4), 821-827.
<https://doi.org/10.1590/1516-1439.010515>
- Carrascal García, M. T., Romero Fernández, A., y Casla Herguedas, M. B. (2016). Guía de aplicación del DB HR protección frente al ruido, versión V.03. *Ministerio de Fomento, Gobierno de España*.
https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HR/GUIA_DBHR_201612.pdf
- Carrión, A. (1998). Diseño acústico de espacios arquitectónicos, UPC Ediciones.
<https://upcommons.upc.edu/handle/2099.3/36341>
- *Casas-Ledón, Y., Daza Salgado, K., Cea, J., Arteaga-Pérez, L. E., y Fuentealba, C. (2020). Life cycle assessment of innovative insulation panels based on eucalyptus bark fibers. *Journal of Cleaner Production*, 249, 119356.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119356>
- *Cascone, S., Rapisarda, R., y Cascone, D. (2019). Physical properties of straw bales as a construction material: A review. *Sustainability*, 11(12), 3388.
<https://doi.org/10.3390/su11123388>
- *Çavuş, V., Şahin, S., Esteves, B., y Ayata, Ü. (2019). Determination of thermal conductivity properties in some wood species obtained from Turkey. *BioResources*, 14(3), 6709-6715.
- *Chabriac, P. A., Gourdon, E., Gle, P., Fabbri, A., y Lenormand, H. (2016). Agricultural by-products for building insulation: Acoustical characterization and modeling to predict micro-structural parameters. *Construction and Building Materials*, 112, 158-167. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.162>
- *Charai, M., Sghiouri, H., Mezrhab, A., y Karkri, M. (2021). Thermal insulation potential of non-industrial hemp (*Moroccan cannabis sativa* L.) fibers for green plaster-based building materials. *Journal of Cleaner Production*, 292, 126064.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126064>
- *Chen, Y., Yu, Q. L., y Brouwers, H. J. H. (2017). Acoustic performance and microstructural analysis of bio-based lightweight concrete containing miscanthus. *Construction and Building Materials*, 157, 839-851.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.161>
- *Cherki, A. B., Remy, B., Khabbazi, A., Jannot, Y., y Baillis, D. (2014). Experimental thermal properties characterization of insulating cork-gypsum composite.

- Construction and Building Materials*, 54, 202-209.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.076>
- *Chin, D. D. V. S., Yahya, M. N. Bin, Che Din, N. Bin, y Ong, P. (2018). Acoustic properties of biodegradable composite micro-perforated panel (BC-MPP) made from kenaf fibre and polylactic acid (PLA). *Applied Acoustics*, 138, 179-187.
<https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.04.009>
- *Christy, E. O., Soemarno, Sumarlan, S. H., y Soehardjono, A. (2021). Binderless bark particleboard made from gelam (*malaleuca viridiflora sol. ex gaertn.*) bark waste: The effect of the pressing temperature on its mechanical and physical properties. *BioResources*, 16(2), 4171-4199.
- *Chu-wang, S., Quan-ping, Y., Jing-da, H., y Kang, Y. (2011). The experimental research on the sound absorption coefficient of several different mytilaria laosensis veneering boards. *Key Engineering Materials*, 486, 95-98.
<https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/KEM.486.95>
- *Ciaburro, G., Puyana-Romero, V., Iannace, G., y Jaramillo-Cevallos, W. A. (2021). Characterization and modeling of corn stalk fibers tied with clay using support vector regression algorithms. *Journal of Natural Fibers*, 19(13), 7141-7156.
<https://doi.org/10.1080/15440478.2021.1944427>
- *Cigasova, J., Stevulova, N., Schwarzova, I., Sicakova, A., y Junak, J. (2015). Application of hemp hurds in the preparation of biocomposites. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 96(1), 012023. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/96/1/012023>
- Cintura, E., Nunes, L., Esteves, B., y Faria, P. (2021). Agro-industrial wastes as building insulation materials: A review and challenges for Euro-Mediterranean countries. *Industrial Crops and Products*, 171, 113833.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113833>
- *Cismaru, I., Hadar, A., y Gherghisan, M. A. (2015). Influence of the structural matrix upon the thermal-transfer factor in the case of the composite boards of hemp hurds (II). *Materiale Plastice*, 52(1), 13-19. <http://www.revmaterialeplastice.ro>
- *Collet, F., Prétot, S., y Lanos, C. (2017). Hemp-straw composites: thermal and hygric performances. *Energy Procedia*, 139, 294-300.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.211>

- Comisión Europea. (2019). Comunicación de la comisión al parlamento europeo, al consejo europeo, al consejo, al comité económico y social europeo y al comité de las regiones. https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0004.02/DOC_1&format=PDF
- *Conti, L., Goli, G., Monti, M., Pellegrini, P., Rossi, G., y Barbari, M. (2017). Simplified method for the characterization of rectangular straw bales (RSB) thermal conductivity. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 245(5), 052035. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/245/5/052035>
- Cosentino, L., Fernandes, J., y Mateus, R. (2023). A Review of natural bio-based insulation materials. *Energies*, 16(12), 4676. <https://doi.org/10.3390/en16124676>
- *Cosereanu, C., Lazarescu, C., Curtu, I., Lica, D., Sova, D., Brenci, L. M., y Stanciu, M. D. (2010). Research on new structures to replace polystyrene used for thermal insulation of buildings. *Materiale Plastice*, 47(3), 341-345.
- *Cravo, J. C. M., Sartori, D. L., y Fiorelli, J. (2017). Agro-industrial waste composites as components for rural buildings. En *Lignocellulosic Fibre and Biomass-Based Composite Materials: Processing, Properties and Applications* (pp. 13-25). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100959-8.00002-0>
- *Čulík, M., Danihelová, A., Ondrejka, V., y Aláč, P. (2020). Sound absorption of board construction materials used in wooden buildings. *Akustika*, 37, 52-58. <https://doi.org/10.36336/akustika20203751>
- *Czajkowski, Ł., Wojcieszak, D., Olek, W., y Przybył, J. (2019). Thermal properties of fractions of corn stover. *Construction and Building Materials*, 210, 709-712. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.092>
- *D'Alessandro, F., Baldinelli, G., Bianchi, F., Sambuco, S., y Rufini, A. (2018). Experimental assessment of the water content influence on thermo-acoustic performance of building insulation materials. *Construction and Building Materials*, 158, 264-274. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.028>
- *D'Alessandro, F., Bianchi, F., Baldinelli, G., Rotili, A., y Schiavoni, S. (2017). Straw bale constructions: Laboratory, in field and numerical assessment of energy and environmental performance. *Journal of Building Engineering*, 11, 56-68. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2017.03.012>
- Davies, H. T. O., y Crombie, I. K. (1998). Getting to grips with systematic reviews and

- meta-analyses. *Hospital Medicine*, 59(12), 955-958.
- *Da Rosa, L. C., Santor, C. G., Lovato, A., Da Rosa, C. S., y Güths, S. (2015). Use of rice husk and sunflower stalk as a substitute for glass wool in thermal insulation of solar collector. *Journal of Cleaner Production*, 104, 90-97. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.127>
- *Daeipour, Z., Safdari, V., y Nurbakhsh, A. (2017). Evaluation fo the acoustic properties of wood-plastic-chalk composites. *Engineering Technology y Applied Science Research*, 7(2), 1540-1545. <https://doi.org/10.48084/etasr.830>
- de Brito, J., y Kurda, R. (2021). The past and future of sustainable concrete: A critical review and new strategies on cement-based materials. *Journal of Cleaner Production*, 281, 123558. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123558>
- *de Carvalho, P. S., Nora, M. D., y da Rosa, L. C. (2020). Development of an acoustic absorbing material based on sunflower residue following the cleaner production techniques. *Journal of Cleaner Production*, 270, 122478. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122478>
- de la Hera, G., Muñoz-Díaz, I., Cifrian, E., Vitorica, R., Gutierrez San Martin, O., y Viguri, J. R. (2017). Comparative environmental life cycle analysis of stone wool production using traditional and alternative materials. *Waste and Biomass Valorization*, 8(5), 1505-1520. <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9660-8>
- De Longcamp, M., y Mouton, Y. (2013). Organic materials used in construction at the dawn of the third millennium. En Mouton, Y. (Ed.), *Organic Materials for Sustainable Construction* (pp. 1-14). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118616734.ch1>
- *De Luca Bossa, F., Santillo, C., Verdolotti, L., Campaner, P., Minigher, A., Boggioni, L., Losio, S., Coccia, F., Iannace, S., y Lama, G. C. (2020). Greener nanocomposite polyurethane foam based on sustainable polyol and natural fillers: Investigation of chemico-physical and mechanical properties. *Materials*, 13(1). <https://doi.org/10.3390/ma13010211>
- *Degrave-Lemeurs, M., Glé, P., y Hellouin de Menibus, A. (2018). Acoustical properties of hemp concretes for buildings thermal insulation: Application to clay and lime binders. *Construction and Building Materials*, 160, 462-474. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.064>
- *Delhomme, F., Hajimohammadi, A., Almeida, A., Jiang, C., Moreau, D., Gan, Y., Wang,

- X., y Castel, A. (2020). Physical properties of Australian hurd used as aggregate for hemp concrete. *Materials Today Communications*, 24, 100986. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.100986>
- Devadiga, D. G., Bhat, K. S., y Mahesha, G. T. (2020). Sugarcane bagasse fiber reinforced composites: Recent advances and applications. *Cogent Engineering*, 7(1). <https://doi.org/10.1080/23311916.2020.1823159>
- *Dhakal, U., Berardi, U., Gorgolewski, M., y Richman, R. (2017). Hygrothermal performance of hempcrete for Ontario (Canada) buildings. *Journal of Cleaner Production*, 142, 3655-3664. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.102>
- *Díaz, C., Jiménez, M., Navacerrada, M. A., y Pedrero, A. (2012). Propiedades acústicas de los paneles de carrizo. *Materiales de Construcción*, 62(305), 55-66. <https://doi.org/10.3989/mc.2010.60510>
- *Diéye, Y., Momar GUEYE, P., Moussa TOURE, P., Bodian, S., Sambou, V., y Tigampo, S. (2020). Comparison of two types of binders naturals on the mechanical and thermal properties of typha leaf powder panels. *Sigma Journal of Engineerig and Natural Sciences*, 38(4), 2069-2081.
- *Doost-Hoseini, K., Taghiyari, H. R., y Elyasi, A. (2014). Correlation between sound absorption coefficients with physical and mechanical properties of insulation boards made from sugar cane bagasse. *Composites Part B: Engineering*, 58, 10-15. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.10.011>
- *Dos Santos Siqueira, F. F., Cosse, R. L., Pinto, F. A. de N. C., Mareze, P. H., Silva, C. F. E., y Nunes, L. C. C. (2021). Characterization of buriti (*mauritia flexuosa*) foam for thermal insulation and sound absorption applications in buildings. *Buildings*, 11(7), 292. <https://doi.org/10.3390/buildings11070292>
- Duan, Y., Liu, K., Qi, J., Li, C., Xie, H., Du, H., Xu, T., y Si, C. (2023). Industrial crops & products engineering lignocellulose-based composites for advanced structural materials. *Industrial Crops & Products*, 205(October), 117562. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117562>
- *Dukarska, D., Czarnecki, R., Dziurka, D., y Mirski, R. (2017). Construction particleboards made from rapeseed straw glued with hybrid pMDI/PF resin. *European Journal of Wood and Wood Products*, 75(2), 175-184. <https://doi.org/10.1007/s00107-016-1143-x>

- Dunne, R., Desai, D., y Sadiku, R. (2017). A review of the factors that influence sound absorption and the available empirical models for fibrous materials. *Acoustics Australia*, 45(2), 453-469. <https://doi.org/10.1007/s40857-017-0097-4>
- *Echeverria, C. A., Pahlevani, F., Handoko, W., Jiang, C., Doolan, C., y Sahajwalla, V. (2019). Engineered hybrid fibre reinforced composites for sound absorption building applications. *Resources, Conservation and Recycling*, 143, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.12.014>
- *Efe, F. T., y Alma, M. H. (2014). Investigating some physical properties of composite board, produced from sunflower stalks, designed horizontally. *Ekoloji*, 23(90), 40-48. <https://doi.org/10.5053/ekoloji.2014.905>
- Egab, L., Wang, X., y Fard, M. (2014). Acoustical characterisation of porous sound absorbing materials: A review. *International Journal of Vehicle Noise and Vibration*, 10(1-2), 129-149. <https://doi.org/10.1504/IJVNV.2014.059634>
- EN 13501-1 + A1. (2009). Fire classification of construction products and building elements — Part 1: Classification using data from reaction to fire tests (EN 13501-1:2007). *European Committee for Standardization*, 3(November 2006), 1-56.
- *El Azhary, K., Chihab, Y., Mansour, M., Laaroussi, N., y Garoum, M. (2017). Energy efficiency and thermal properties of the composite material clay-straw. *Energy Procedia*, 141, 160-164. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.030>
- *El Fgaier, F., Lafhaj, Z., y Chapiseau, C. (2016). Improvement insulating properties of ceramic materials by incorporating additives. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(8), 05016001. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001552](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001552)
- *Elsacker, E., Vandelook, S., Brancart, J., Peeters, E., y De Laet, L. (2019). Mechanical, physical and chemical characterisation of mycelium-based composites with different types of lignocellulosic substrates. *PLoS ONE*, 14(7), e0213954. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0213954>
- Elseify, L. A., Midani, M., Shihata, L. A., y El-Mously, H. (2019). Review on cellulosic fibers extracted from date palms (*Phoenix Dactylifera* L.) and their applications. *Cellulose*, 26(4), 2209-2232. <https://doi.org/10.1007/s10570-019-02259-6>
- *Etuk, S. E., Akpabio, L. E., y Akpan, I. O. (2010). Comparative study of thermal transport in zea mays straw and zea mays heartwood (cork) boards. *Thermal Science*, 14(1), 31-38. <https://doi.org/10.2298/TSCI1001031E>

- *Ezenwa, O. N., Obika, E. N., Umembamalu, C., y Nwoye, F. C. (2019). Development of ceiling board using breadfruit seed coat and recycled low density polyethylene. *Heliyon*, 5(11), e02712. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02712>
- Eziefula, U. G., Ezech, J. C., y Eziefula, B. I. (2018). Properties of seashell aggregate concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 192, 287-300. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.096>
- Farnood Ahmadi, P., Ardeshir, A., Ramezani-pour, A. M., y Bayat, H. (2018). Characteristics of heat insulating clay bricks made from zeolite, waste steel slag and expanded perlite. *Ceramics International*, 44(7), 7588-7598. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.01.175>
- Farooque, R., Asjad, M., y Rizvi, S. J. A. (2020). A current state of art applied to injection moulding manufacturing process - A review. *Materials Today: Proceedings*, 43, 441-446. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.967>
- Fatima, S., y Mohanty, A. R. (2011). Acoustical and fire-retardant properties of jute composite materials. *Applied Acoustics*, 72(2-3), 108-114. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2010.10.005>
- *Faustino, J., Pereira, L., Soares, S., Cruz, D., Paiva, A., Varum, H., Ferreira, J., y Pinto, J. (2012). Impact sound insulation technique using corn cob particleboard. *Construction and Building Materials*, 37, 153-159. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2012.07.064>
- *Fernandes, E. M., Correlo, V. M., Chagas, J. A. M., Mano, J. F., y Reis, R. L. (2011). Properties of new cork-polymer composites: Advantages and drawbacks as compared with commercially available fibreboard materials. *Composite Structures*, 93(12), 3120-3129. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2011.06.020>
- *Fernea, R., Manea, D. L., Plesa, L., Iernuțan, R., y Dumitran, M. (2019). Acoustic and thermal properties of hemp-cement building materials. *Procedia Manufacturing*, 32, 208-215. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.204>
- *Fernea, R., Manea, D. L., Roxana Tămaș-Gavrea, D., y Miron, O. I. (2017a). Preliminary research on using industrial plants in constructions. *Scientific Papers Series Management, Economic Engineering in Agriculture and Rural Development*, 17(1), 203-208.
- *Fernea, R., Tămaș-Gavrea, D. R., Manea, D. L., Roșca, I. C., Aciu, C., y Munteanu, C.

- (2017b). Multicriterial analysis of several acoustic absorption building materials based on hemp. *Procedia Engineering*, 181, 1005-1012. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.500>
- *Ferrández-García, C.-E., Ferrández-García, A., Ferrández-Villena, M., Hidalgo-Cordero, J., García-Ortuño, T., y Ferrández-García, M.-T. (2018). Physical and mechanical properties of particleboard made from palm tree prunings. *Forests*, 9(12), 755. <https://doi.org/10.3390/f9120755>
- *Ferrandez-Garcia, C. C., Garcia-Ortuño, T., Ferrandez-Garcia, M. T., Ferrandez-Villena, M., y Ferrandez-Garcia, C. E. (2017). Fire-resistance, physical, and mechanical characterization of binderless rice straw particleboards. *BioResources*, 12(4), 8539-8549. <https://doi.org/10.15376/biores.12.4.8539-8549>
- *Ferrandez-Garcia, M. T., Ferrandez-Garcia, A., Garcia-Ortuño, T., Ferrandez-Garcia, C. E., y Ferrandez-Villena, M. (2020a). Influence of particle size on the properties of boards made from washingtonia palm rachis with citric acid. *Sustainability*, 12(12), 4841. <https://doi.org/10.3390/su12124841>
- *Ferrandez-García, M. T., Ferrandez-Garcia, A., Garcia-Ortuño, T., Ferrandez-Garcia, C. E., y Ferrandez-Villena, M. (2020b). Assessment of the physical, mechanical and acoustic properties of arundo donax L. biomass in low pressure and temperature particleboards. *Polymers*, 12(6), 1361. <https://doi.org/10.3390/polym12061361>
- *Ferrandez-Garcia, M. T., Ferrandez-Garcia, C. E., Garcia-Ortuño, T., Ferrandez-Garcia, A., y Ferrandez-Villena, M. (2019). Experimental evaluation of a new giant reed (Arundo donax L.) composite using citric acid as a natural binder. *Agronomy*, 9(12), 882. <https://doi.org/10.3390/agronomy9120882>
- *Ferrandez-Villena, M., Ferrandez-Garcia, C. E., Garcia-Ortuño, T., Ferrandez-Garcia, A., y Ferrandez-Garcia, M. T. (2020a). Analysis of the thermal insulation and fire-resistance capacity of particleboards made from vine (vitis vinifera L.) prunings. *Polymers*, 12(5), 1147. <https://doi.org/10.3390/polym12051147>
- *Ferrandez-Villena, M., Ferrandez-Garcia, C. E., Garcia-Ortuño, T., Ferrandez-Garcia, A., y Ferrandez-Garcia, M. T. (2020b). Properties of cement-bonded particleboards made from canary islands palm (phoenix canariensis ch.) trunks and different amounts of potato starch. *Forests*, 11(5), 560. <https://doi.org/10.3390/f11050560>
- *Fino, R., Tadeu, A., y Simões, N. (2018). Influence of a period of wet weather on the heat transfer across a wall covered with uncoated medium density expanded cork.

- Energy and Buildings*, 165, 118-131. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.01.020>
- *Florea, I., y Manea, D. L. (2019). Analysis of thermal insulation building materials based on natural fibers. *Procedia Manufacturing*, 32, 230-235. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.207>
- *Fu, H., Ding, Y., Li, M., Li, H., Huang, X., y Wang, Z. (2020). Research on thermal performance and hygrothermal behavior of timber-framed walls with different external insulation layer: Insulation cork board and anti-corrosion pine plate. *Journal of Building Engineering*, 28, 101069. <https://doi.org/10.1016/j.job.2019.101069>
- *Gadea Borrell, J. M., Juliá Sanchis, E., Segura Alcaraz, J., y Montava Belda, I. (2020). Sustainable sound absorbers from fruit stones waste. *Applied Acoustics*, 161, 107174. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.107174>
- *Gaujena, B., Agapovs, V., Borodinecs, A., y Strelets, K. (2020). Analysis of thermal parameters of hemp fiber insulation. *Energies*, 13(23), 6385. <https://doi.org/10.3390/en13236385>
- Ge, B., y Campopiano, G. (2022). Knowledge management in family business succession: Current trends and future directions. *Journal of Knowledge Management*, 26(2), 326-349. <https://doi.org/10.1108/JKM-09-2020-0701>
- *Georgescu, S.-V., Coşereanu, C., Fotin, A., Brenci, L.-M., y Costiuc, L. (2019). Experimental thermal characterization of timber frame exterior wall using reed straws as heat insulation materials. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 138(4), 2505-2513. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08325-2>
- *Georgescu, S. V., y Cosereanu, C. (2018). Comparative analysis of thermal and acoustic performance of composites made from wood fibres, recycled rubber and ABS. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 399(1), 012019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/399/1/012019>
- *Georgiev, G., Krus, M., Loretz, C., y Theuerkorn, W. (2019). Typhaboard in the restoration of historic black sea houses in Bulgaria. *Sustainability*, 11(4), 1000. <https://doi.org/10.3390/su11041000>
- *Ghofrani, M., Ashori, A., y Mehrabi, R. (2017). Mechanical and acoustical properties of particleboards made with date palm branches and vermiculite. *Polymer Testing*, 60, 153-159. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2017.03.028>
- *Ghosh, S. K., Sengupta, S., y Naskar, M. (2010). Physio-mechanical properties of particle

- boards from agro-wastes. *Journal of Scientific y Industrial Research*, 69, 396-400.
- Giannotas, G., Kamperidou, V., y Barboutis, I. (2021). Tree bark utilization in insulating bio-aggregates: A review. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 15(6), 1989-1999. <https://doi.org/10.1002/bbb.2291>
- *Gibson, A. G. (1930). Insulating board from straw. *Industrial and Engineering Chemistry*, 22(3), 223-226.
- *Gil-Lopez, T., Medina-Molina, M., Verdu-Vazquez, A., y Martel-Rodriguez, B. (2017). Acoustic and economic analysis of the use of palm tree pruning waste in noise barriers to mitigate the environmental impact of motorways. *Science of the Total Environment*, 584-585, 1066-1076. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.162>
- *Glé, P., Gourdon, E., y Arnaud, L. (2011). Acoustical properties of materials made of vegetable particles with several scales of porosity. *Applied Acoustics*, 72(5), 249-259. <https://doi.org/10.1016/J.APACOUST.2010.11.003>
- *Glé, P., Gourdon, E., Arnaud, L., Horoshenkov, K.-V., y Khan, A. (2013). The effect of particle shape and size distribution on the acoustical properties of mixtures of hemp particles. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 134(6), 4698-4709. <https://doi.org/10.1121/1.4824931>
- *Gliścińska, E., Kaczor, M., Milc, A., Misztela, A., Warczyk, P., y Krucińska, I. (2019). Biocomposites for sound absorption. *Composites Theory and Practice*, 19(3), 107-111.
- *Gliscinska, E., Krucinska, I., Michalak, M., Puchalski, M., Ciechanska, D., Kazimierczak, J., y Bloda, A. (2016). Bio-Based Composites for Sound Absorption. En Poletto, M. (Ed.), *Composites from Renewable and Sustainable Materials* (pp. 217-239). InTech. <https://doi.org/10.5772/65360>
- *Gliscinska, E., Perez de Amezaga, J., Michalak, M., y Krucinska, I. (2021). Green sound-absorbing composite materials of various structure and profiling. *Coatings*, 11(4), 407. <https://doi.org/10.3390/coatings11040407>
- *Gomez, T. S., Navacerrada, M. A., Díaz, C., y Fernández-Morales, P. (2020a). Figue fibres as a sustainable material for thermoacoustic conditioning. *Applied Acoustics*, 164. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107240>
- *Gomez, T. S., Zuluaga, S., Jimenez, M., Navacerrada, M. de los Á., Barbero-Barrera, M. D. M., Prida, D. de la, Restrepo-Osorio, A., y Fernández-Morales, P. (2020b). Evaluation of colombian crops fibrous byproducts for potential applications in

- sustainable building acoustics. *Polymers*, 13(1), 101.
<https://doi.org/10.3390/polym13010101>
- Gómez Escobar, V., y Maderuelo-Sanz, R. (2017). Acoustical performance of samples prepared with cigarette butts. *Applied Acoustics*, 125, 166-172.
<https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.05.001>
- *Gößwald, J., Barbu, M.-C., Petutschnigg, A., y Tudor, E. M. (2021). Binderless thermal insulation panels made of spruce bark fibres. *Polymers*, 13(11), 1799.
<https://doi.org/10.3390/polym13111799>
- *Gounni, A., y Louahlia, H. (2020). Dynamic behavior and economic analysis of sustainable building integrating cob and phase change materials. *Construction and Building Materials*, 262, 120795. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120795>
- *Gourlay, E., Glé, P., Marceau, S., Foy, C., y Moscardelli, S. (2017). Effect of water content on the acoustical and thermal properties of hemp concretes. *Construction and Building Materials*, 139, 513-523. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.018>
- *Guna, V., Ilangovan, M., Hu, C., Venkatesh, K., y Reddy, N. (2019). Valorization of sugarcane bagasse by developing completely biodegradable composites for industrial applications. *Industrial Crops and Products*, 131, 25-31.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.01.011>
- *Guna, V., Ilangovan, M., Rather, M. H., Giridharan, B. V., Prajwal, B., Vamshi Krishna, K., Venkatesh, K., y Reddy, N. (2020). Groundnut shell/rice husk agro-waste reinforced polypropylene hybrid biocomposites. *Journal of Building Engineering*, 27, 100991. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100991>
- *Guna, V., Ilangovan, M., Reddy, N., Radhakrishna, P., Maharaddi, V., Jambunath, A., y Rao, A. P. (2021). Biobased insulating panels from mulberry stems. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 36(2), 453-472.
<https://doi.org/10.1177/08927057211010884>
- Guna, V., Yadav, C., Maithri, B. R., Ilangovan, M., Touchaleaume, F., Saulnier, B., Grohens, Y., y Reddy, N. (2021). Wool and coir fiber reinforced gypsum ceiling tiles with enhanced stability and acoustic and thermal resistance. *Journal of Building Engineering*, 41, 102433. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102433>
- *Hajj, N. El, Mboumba-Mamboundou, B., Dheilly, R. M., Aboura, Z., Benzeggagh, M., y Queneudec, M. (2011). Development of thermal insulating and sound absorbing

- agro-sourced materials from auto linked flax-tows. *Industrial Crops and Products*, 34(1), 921-928. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2011.02.012>
- Hankhantod, P., Phoo-Ngernkham, T., y Krittacom, B. (2022). Microstructure and mechanical properties of gypsum board produced from water hyacinth fiber. *Materials Science Forum*, 1058, 119-126. <https://doi.org/10.4028/p-a4325q>
- *Hassan, T., Jamshaid, H., Mishra, R., Khan, M. Q., Petru, M., Novak, J., Choteborsky, R., y Hromasova, M. (2020). Acoustic, mechanical and thermal properties of green composites reinforced with natural fibers waste. *Polymers*, 12(3), 654. <https://doi.org/10.3390/polym12030654>
- Hassanin, A. H., Candan, Z., Demirkir, C., y Hamouda, T. (2018). Thermal insulation properties of hybrid textile reinforced biocomposites from food packaging waste. *Journal of Industrial Textiles*, 47(6), 1024-1037. <https://doi.org/10.1177/1528083716657820>
- *Hazrati-Behnagh, M., Zarea-Hosseiniabadi, H., Daliri-Sosefi, M., Abginehchi, Z., y Hemmati, A. (2016). Mechanical and insulating performances of ultralight thick particleboard from sugarcane residues and woods planer shaving. *European Journal of Wood and Wood Products*, 74(2), 161-168. <https://doi.org/10.1007/s00107-015-0989-7>
- He, L., Tao, M., Liu, Z., Cao, Z., Zhu, J., Gao, J., Den, W. V., Chailleux, E., Huang, Y., Vasconcelos, K., Cannone, A., Balieu, R., Grenfell, J., Wilson, D. J., Valentin, J., Kowalski, K. J., Rzek, L., Gaspar, L., Ling, T., y Ma, Y. (2023). Biomass valorization toward sustainable asphalt pavements : Progress and prospects. *Waste Management*, 165, 159-178. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.03.035>
- *Hellová, K. E., Unčík, S., y Cabanová, T. (2020). Sorption properties of thermal insulation composed of flax or hemp fibers. *Slovak Journal of Civil Engineering*, 28(3), 47-52. <https://doi.org/10.2478/sjce-2020-0023>
- Hernández Linares, R., y Arias-Abelaira, T. (2022). Adapt or perish ! A systematic review of the literature on strategic renewal and the family firm. *European Journal of Family Business*, 12(2), 137-155. <https://doi.org/10.24310/ejfbefb.v12i2.14718>
- Hossain, I., Anjum, N., y Tasnim, T. (2016). Removal of arsenic from contaminated water utilizing tea waste. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 13(3), 843-848. <https://doi.org/10.1007/s13762-016-0932-4>

- *Hosseini Fouladi, M., Nor, M., Ayub, M., y Ghassem, M. (2012). Enhancement of coir fiber normal incidence sound absorption coefficient. *Journal of Computational Acoustics*, 20(01), 1250003. <https://doi.org/10.1142/S0218396X11004493>
- *Hosseini Fouladi, M., Ayub, M., y Jailani Mohd Nor, M. (2011). Analysis of coir fiber acoustical characteristics. *Applied Acoustics*, 72(1), 35-42. <https://doi.org/10.1016/J.APACOUST.2010.09.007>
- *Huang, C. H., Lin, J. H., Lou, C. W., y Tsai, Y. T. (2013a). The efficacy of coconut fibers on the sound-absorbing and thermal-insulating nonwoven composite board. *Fibers and Polymers*, 14(8), 1378-1385. <https://doi.org/10.1007/S12221-013-1378-7>
- *Huang, Q., Xiong, F., Fan, K., y He, Y. (2013b). An experimental study on thermal insulation performance of straw wire aircraft sandwich panel. *Advanced Materials Research*, 639-640(1), 1307-1312. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.639-640.1307>
- Huang, Y., Xu, C., Zhang, X., y Li, L. (2022). Bibliometric analysis of landslide research based on the WOS database. *Natural Hazards Research*, 2(2), 49-61. <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2022.02.001>
- *Huda, S., Reddy, N., y Yang, Y. (2012). Ultra-light-weight composites from bamboo strips and polypropylene web with exceptional flexural properties. *Composites Part B: Engineering*, 43(3), 1658-1664. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2012.01.017>
- *Huda, S., y Yang, Y. (2009). A novel approach of manufacturing light-weight composites with polypropylene web and mechanically split cornhusk. *Industrial Crops and Products*, 30(1), 17-23. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2008.12.007>
- Hung Anh, L. D., y Pásztor, Z. (2021). An overview of factors influencing thermal conductivity of building insulation materials. *Journal of Building Engineering*, 44. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102604>
- *Hussain, A., Calabria-Holley, J., Lawrence, M., y Jiang, Y. (2019). Hygrothermal and mechanical characterisation of novel hemp shiv based thermal insulation composites. *Construction and Building Materials*, 212, 561-568. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.029>
- *Hussein, Z., Ashour, T., Khalil, M., Bahnasawy, A., Ali, S., Hollands, J., y Korjenic, A. (2019). Rice straw and flax fiber particleboards as a product of agricultural waste:

- An evaluation of technical properties. *Applied Sciences*, 9(18), 3878. <https://doi.org/10.3390/app9183878>
- *Hýsek, Š., Frydrych, M., Herclík, M., Fridrichová, L., Louda, P., Knížek, R., Van, S. Le, y Chi, H. Le. (2019a). Permeable water-resistant heat insulation panel based on recycled materials and its physical and mechanical properties. *Molecules*, 24(18), 3300. <https://doi.org/10.3390/molecules24183300>
- * Hýsek, Š., Neuberger, P., Sikora, A., Schönfelder, O., y Ditommaso, G. (2019b). Waste utilization: Insulation panel from recycled polyurethane particles and wheat husks. *Materials*, 12(19), 3075. <https://doi.org/10.3390/ma12193075>
- *Iannace, G. (2017). The acoustic characterization of green materials. *Building Acoustics*, 24(2), 101-113. <https://doi.org/10.1177/1351010X17704624>
- *Iannace, G., Ciaburro, G., Guerriero, L., y Trematerra, A. (2020). Use of cork sheets for room acoustic correction. *Journal of Green Building*, 15(2), 45-55. <http://meridian.allenpress.com/jgb/article-pdf/15/2/45/2551385/i1943-4618-15-2-45.pdf>
- *Ibragimov, A. M., Vakhnina, T. N., y Susoeva, I. V. (2018). Use of irretrievable waste flax and cotton for production of heat-insulating plates. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 451(1), 012005. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/451/1/012005>
- Ibrahim, M., Nocentini, K., Stipetic, M., Dantz, S., Caiazzo, F. G., Sayegh, H., y Bianco, L. (2019). Multi-field and multi-scale characterization of novel super insulating panels/systems based on silica aerogels: Thermal, hydric, mechanical, acoustic, and fire performance. *Building and Environment*, 151, 30-42. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.01.019>
- Ilham, Z. (2021). Biomass classification and characterization for conversion to biofuels. En Yusup, S., y Rashidi, N. A. (Eds.), *Value-Chain of Biofuels* (pp. 69-87). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824388-6.00014-2>
- Ingrao, C., Lo Giudice, A., Bacenetti, J., Tricase, C., Dotelli, G., Fiala, M., Siracusa, V., y Mbohwa, C. (2015). Energy and environmental assessment of industrial hemp for building applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 29-42. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.002>
- *Intaboot, N. (2020). Innovation of interlocking block mixing with biomass for sound

- absorption and thermal conductivity in thailand. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 18(8), 473-480. <https://doi.org/10.3151/jact.18.473>
- *Islam, S., y Mominul Alam, S. M. (2018). Investigation of the acoustic properties of needle punched nonwoven produced of blend with sustainable fibers. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 30(3), 444-458. <https://doi.org/10.1108/IJCST-01-2018-0012>
- *Ismail, B., Belayachi, N., y Hoxha, D. (2020). Optimizing performance of insulation materials based on wheat straw, lime and gypsum plaster composites using natural additives. *Construction and Building Materials*, 254, 118959. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118959>
- *Iswanto, A. H., Hakim, A. R., Azhar, I., Wirjosentono, B., y Prabuningrum, D. S. (2020). The physical, mechanical, and sound absorption properties of sandwich particleboard (SPb). *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, 48(1), 32-40. <https://doi.org/10.5658/WOOD.2020.48.1.32>
- *Iwaro, J., y Mwashu, A. (2019). effects of using coconut fiber–insulated masonry walls to achieve energy efficiency and thermal comfort in residential dwellings. *Journal of Architectural Engineering*, 25(1), 04019001. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ae.1943-5568.0000341](https://doi.org/10.1061/(asce)ae.1943-5568.0000341)
- ISO. (1997). ISO 11654:1997. Acoustics: Sound absorbers for use in buildings — Rating of sound absorption, 1-7. <https://www.iso.org/standard/19583.html>
- ISO. (1998). ISO 10534-2:2002. Acoustics: Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedances tubes. Part 2: transfer-function method., 1-27. <https://www.iso.org/standard/22851.html>
- *Jamaluddin, J. F., Firouzi, A., Islam, M. R., y Yahaya, A. N. A. (2020). Effects of luffa and glass fibers in polyurethane-based ternary sandwich composites for building materials. *SN Applied Sciences*, 2(7), 1207. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-3037-0>
- *Jayamani, E., Hamdan, S., y Rahman, M. R. (2014). Synthesis and characterization of epoxy resin reinforced with luffa fiber composites for sound absorption. *Applied Mechanics and Materials*, 624, 36-41. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.624.36>
- *Jayamani, E., Hamdan, S., Rahman, M. R., Khusairy, M., y Bakri, B. (2015). Study of sound absorption coefficients and characterization of rice straw stem fibers

- reinforced polypropylene composites. *BioResources*, 10(2), 3378-3392.
- Jelle, B. P. (2011). Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions - Properties, requirements and possibilities. *Energy and Buildings*, 43(10), 2549-2563. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.05.015>
- Jeng, M. C., Chen, S. C., Minh, P. S., Chang, J. A., y Chung, C. shen. (2010). Rapid mold temperature control in injection molding by using steam heating. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37(9), 1295-1304. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2010.07.012>
- *Jeon, J., Park, J. H., Yuk, H., Kim, Y. U., Yun, B. Y., Wi, S., y Kim, S. (2021). Evaluation of hygrothermal performance of wood-derived biocomposite with biochar in response to climate change. *Environmental Research*, 193, 110359. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110359>
- *Jerman, M., Palomar, I., Kočí, V., y Černý, R. (2019). Thermal and hygric properties of biomaterials suitable for interior thermal insulation systems in historical and traditional buildings. *Building and Environment*, 154, 81-88. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.03.020>
- *Jin, Z., Li, J., Wang, Q., Su, W., Duan, X., y Tang, Z. (2021). Characterization of multifunctional panels from jute fibers for interior wall covering. *Industrial Crops and Products*, 167, 113530. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113530>
- Joshi, M. P., Shrivage, P., Jain, S. K., y Karanth, N. V. (2011). A Comparative study on flow resistivity for different polyurethane foam samples. *Journal of Acoustical Society of India*, 38(4), 153-157.
- *Kain, G., Barbu, M.-C., Teischinger, A., Musso, M., y Petutschnigg, A. (2012). Substantial bark use as insulation material. *Forest Products Journal*, 62(6), 480-487. <https://doi.org/10.13073/FPJ-D-12-00052.1>
- *Kain, G., Charwat-Pessler, J., Barbu, M. C., Plank, B., Richter, K., y Petutschnigg, A. (2016). Analyzing wood bark insulation board structure using X-ray computed tomography and modeling its thermal conductivity by means of finite difference method. *Journal of Composite Materials*, 50(6), 795-806. <https://doi.org/10.1177/0021998315581511>
- *Kain, G., Lienbacher, B., Barbu, M. C., Richter, K., y Petutschnigg, A. (2018). Larch (*Larix decidua*) bark insulation board: Interactions of particle orientation, physical–

- mechanical and thermal properties. *European Journal of Wood and Wood Products*, 76(2), 489-498. <https://doi.org/10.1007/s00107-017-1271-y>
- *Kain, G., Tudor, E. M., y Barbu, M. C. (2020). Bark thermal insulation panels: An explorative study on the effects of bark species. *Polymers*, 12(9), 2140. <https://doi.org/10.3390/POLYM12092140>
- Kalyani, P., y Anitha, A. (2013). Biomass carbon & its prospects in electrochemical energy systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(10), 4034-4045. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.01.048>
- *Kamau-Devers, K., Kortum, Z., y Miller, S. A. (2019). Hydrothermal aging of bio-based poly(lactic acid) (PLA) wood polymer composites: Studies on sorption behavior, morphology, and heat conductance. *Construction and Building Materials*, 214, 290-302. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.098>
- *Kang, C.-W., Lee, N.-H., Jang, S.-S., y Kang, H.-Y. (2019a). Sound absorption coefficient and sound transmission loss of rice hull mat. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, 47(3), 290-298. <https://doi.org/10.5658/WOOD.2019.47.3.290>
- *Kang, C.-W., Li, Cheng-Yuan, Kang, H.-Y., Kang, S.-, y Goo. (2019b). Comparison the sound absorption rate of mandarin peel-sawdust composite boards measured by transfer function method with by reverberation room method. *Journal of the Faculty of Agriculture Kyushu University*, 64(1), 107-111. <http://hdl.handle.net/2324/2232293>
- *Kang, C. W., Oh, S. W., Lee, T. B., Kang, W., y Matsumura, J. (2012). Sound absorption capability and mechanical properties of a composite rice hull and sawdust board. *Journal of Wood Science*, 58(3), 273-278. <https://doi.org/10.1007/S10086-011-1243-5>
- *Kang, S.-, Goo, Lee, S.-, y Ae. (2015). A study on heat transfer of paulownia coreana and high-density fiberboard via comparative analysis. *Journal of the faculty on agriculture Kyushu University*, 60(1), 191-195. <http://hdl.handle.net/2324/1526303>
- *Karademir, A., Aydemir, C., y Yenidoğan, S. (2011). Sound absorption and print density properties of recycled sheets made from waste paper and agricultural plant fibres. *African Journal of Agricultural Research*, 6(28), 6073-6081. <https://doi.org/10.5897/AJAR11.2096>
- *Karaky, H., Maalouf, C., Bliard, C., Gacoin, A., El Wakil, N., y Polidori, G. (2019). Characterization of beet-pulp fiber reinforced potato starch biopolymer composites for building applications. *Construction and Building Materials*, 203, 711-721.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.127>

- *Karaky, H., Maalouf, C., Bliard, C., Moussa, T., El Wakil, N., Lachi, M., y Polidori, G. (2018). Hygrothermal and acoustical performance of starch-beet pulp composites for building thermal insulation. *Materials*, 11(9), 1622. <https://doi.org/10.3390/ma11091622>
- *Karlinsari, L., Adzkie, U., Sudarsono, A. S., Larasatie, P., Amin, Y., y Nugroho, N. (2021). Surface characteristics and acoustical properties of bamboo particle board coated with polyurethane varnish. *Forests*, 12(9), 1285. <https://doi.org/10.3390/f12091285>
- *Karlinsari, L., Hermawan, D., Maddu, A., Martianto, B., Lucky, I. K., Nugroho, N., y Hadi, Y. S. (2012a). Acoustical properties of particleboards made from betung bamboo (*dendrocalamus asper*) as building construction material. *BioResources*, 7(4), 5700-5709.
- *Karlinsari, L., Maddu, A., y Hadi, Y. S. (2012b). Development of particleboard from tropical fast-growing species for acoustic panel. *Journal of Tropical Forest Science*, 24(1), 64-69. <https://www.researchgate.net/publication/228463428>
- *Kawasaki, T., y Kawai, S. (2006). Thermal insulation properties of wood-based sandwich panel for use as structural insulated walls and floors. *Journal of Wood Science*, 52(1), 75-83. <https://doi.org/10.1007/s10086-005-0720-0>
- *Kerdongmee, P., Saleh, A., Eadkhong, T., y Danworaphong, S. (2016). Investigating sound absorption of oil palm trunk panels using one-microphone impedance tube. *BioResources*, 11(4), 8409-8418.
- Kevin, E. (2018). Mechanical properties of urea formaldehyde particle board composite. *American Journal of Chemical and Biochemical Engineering*, 2(1), 10. <https://doi.org/10.11648/j.ajcbe.20180201.12>
- *Khankhaje, E., Salim, M. R., Mirza, J., Salmiati, Hussin, M. W., Khan, R., y Rafieizonooz, M. (2017). Properties of quiet pervious concrete containing oil palm kernel shell and cockleshell. *Applied Acoustics*, 122, 113-120. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.02.014>
- *Khidir, E. A., Nikabdullah, N., Nor, M. J. M., Tahir, M. F. M., y Nuawi, M. Z. (2014). A preliminary study on the sound absorption of self-facing date palm fibers. *Applied Mechanics and Materials*, 565, 25-30.

<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.565.25>

- *Kim, B. S., Cho, S. J., Min, D. K., y Park, J. (2015). Sound absorption structure in helical shapes made using fibrous paper. *Composite Structures*, 134, 90-94. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.08.039>
- *Kim, H., Hong, J., y Pyo, S. (2018). Acoustic characteristics of sound absorbable high performance concrete. *Applied Acoustics*, 138, 171-178. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.04.002>
- *Kim, Y. H., y Jang, S. S. (2011). Heat transfer of green timber wall panels. *Korean Journal of Agricultural Science*, 38(1), 115-120. <https://www.kci.go.kr/kciportal/ci/sereArticleSearch/ciSereArtiView.kci?sereArticleSearchBean.artiId=ART001542152>
- *Kinnane, O., Reilly, A., Grimes, J., Pavia, S., y Walker, R. (2016). Acoustic absorption of hemp-lime construction. *Construction and Building Materials*, 122, 674-682. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.106>
- Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B., y Sanders, J. V. (2006). Fundamentals of Acoustics. En Bruneau, M. (Ed.), *Fundamentals of Acoustics* (4th ed.). ISTE. <https://doi.org/10.1002/9780470612439>
- Koizumi, T., Tsujiuchi, N., y Adachi, A. (2002). The development of sound absorbing materials using natural bamboo fibers. En Brebbia, C. y de Wilde, W. (Eds.), *High Performance Structures and Materials* (Vol. 4, pp. 157-166), WIT Press.
- *Kolya, H., y Kang, C.-W. (2021a). Effective changes in cellulose cell walls, gas permeability and sound absorption capability of *Cocos nucifera* (palmwood) by steam explosion. *Cellulose*, 28(9), 5707-5717. <https://doi.org/10.1007/s10570-021-03891-x>
- *Kolya, H., y Kang, C. W. (2021b). Hygrothermal treated paulownia hardwood reveals enhanced sound absorption coefficient: An effective and facile approach. *Applied Acoustics*, 174. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107758>
- *Korjenic, A., Petránek, V., Zach, J., y Hroudová, J. (2011). Development and performance evaluation of natural thermal-insulation materials composed of renewable resources. *Energy and Buildings*, 43(9), 2518-2523. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2011.06.012>
- *Kraus, M., y Kubečková, D. (2014). Analysis of the building materials in the energy

- efficient buildings. *Advanced Materials Research*, 1041, 3-6.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1041.3>
- *Kremensas, A., Kairyte, A., Vaitkus, S., Vėjelis, S., Członka, S., y Strakowska, A. (2019). The impact of hot-water-treated fibre hemp shivs on the water resistance and thermal insulating performance of corn starch bonded biocomposite boards. *Industrial Crops and Products*, 137, 290-299.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.05.031>
- Kumar, D., Alam, M., Zou, P. X. W., Sanjayan, J. G., y Memon, R. A. (2020). Comparative analysis of building insulation material properties and performance. En *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 131, 110038.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110038>
- *Kumfu, S., y Jintakosol, T. (2012). Thermal insulation produced from pineapple leaf fiber and natural rubber latex. *Advanced Materials Research*, 506, 453-456.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.506.453>
- Kuranchie, C., Yaya, A., y Bensah, Y. D. (2021). The effect of natural fibre reinforcement on polyurethane composite foams – A review. *Scientific African*, 11, e00722.
<https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e00722>
- Kusno, A., Mulyadi, R., y Haisah, S. (2019). Study on chicken feather as acoustical absorptive material. *Journal of Physics: Conference Series*, 1150, 012052.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1150/1/012052>
- *Laborel-Préneron, A., Magniont, C., y Aubert, J.-E. (2017). Characterization of barley straw, hemp shiv and corn cob as resources for bioaggregate based building materials. *Waste and Biomass Valorization*, 9(7), 1095-1112.
<https://doi.org/10.1007/s12649-017-9895-z>
- *Lahouioui, M., Ben Arfi, R., Fois, M., Ibos, L., y Ghorbal, A. (2020). Investigation of fiber surface treatment effect on thermal, mechanical and acoustical properties of date palm fiber-reinforced cementitious composites. *Waste and Biomass Valorization*, 11(8), 4441-4455. <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00745-3>
- *Lang, L., Duan, H., y Chen, B. (2020). Experimental investigation on concrete using corn stalk and magnesium phosphate cement under compaction forming technology. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(12), 04020370.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003487](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003487)

- *Latif, E., Tucker, S., Ciupala, M. A., Wijeyesekera, D. C., y Newport, D. (2014). Hygric properties of hemp bio-insulations with differing compositions. *Construction and Building Materials*, 66, 702-711. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.021>
- Lautenberger, C., Torero, J., y Fernandez-Pello, C. (2022). Understanding material flammability. En Apte, V. B. (Ed.), *Flammability Testing of Materials Used in Construction, Transport and Mining* (pp. 1-22). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102801-8.00066-1>
- *Lecourt, M., Pöhler, T., Hornatowska, J., Salmén, L., y Jetsu, P. (2018). Density profiles of novel kraft pulp and TMP based foam formed thermal insulation materials observed by X-ray tomography and densitometry. *Holzforschung*, 72(5), 397-403. <https://doi.org/10.1515/hf-2017-0116>
- Lee, S. H., Lum, W. C., Boon, J. G., Kristak, L., Antov, P., Pędzik, M., Rogoziński, T., Taghiyari, H. R., Lubis, M. A. R., Fatriasari, W., Yadav, S. M., Chotikhun, A., y Pizzi, A. (2022). Particleboard from agricultural biomass and recycled wood waste: A review. *Journal of Materials Research and Technology*, 20, 4630-4658. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.08.166>
- *Lenormand, H., Glé, P., y Leblanc, N. (2017). Investigation of the acoustical and thermal properties of sunflower particleboards. *Acta Acustica United with Acustica*, 103(1), 149-157. <https://doi.org/10.3813/AAA.919040>
- *Li, H., Zou, S., Liu, T., Wang, S., Zou, J., Zhang, X., Liu, L., Bai, C., y Zhang, G. (2020). Research on a composite biomass insulation material with geopolymers as binders and forestry waste as fillers. *Journal of Thermal Science*, 31(2), 590-605. <https://doi.org/10.1007/s11630-020-1387-y>
- *Li, M., Nicolas, V., Khelifa, M., El Ganaoui, M., Fierro, V., y Celzard, A. (2019). Modelling the hygrothermal behaviour of cement-bonded wood composite panels as permanent formwork. *Industrial Crops and Products*, 142, 111784. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111784>
- *Lim, Z. Y., Putra, A., Nor, M. J. M., y Yaakob, M. Y. (2018). Sound absorption performance of natural kenaf fibres. *Applied Acoustics*, 130, 107-114. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.09.012>
- *Liu, D. T., Xia, K. F., Yang, R. D., Li, J., Chen, K. F., y Nazhad, M. M. (2012). Manufacturing of a biocomposite with both thermal and acoustic properties. *Journal of Composite Materials*, 46(9), 1011-1020. <https://doi.org/10.1177/0021998311414069>

- Liu, L., Li, H., Lazzaretto, A., Manente, G., Tong, C., Liu, Q., y Li, N. (2017a). The development history and prospects of biomass-based insulation materials for buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 912-932. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.140>
- *Liu, L., Zou, S., Li, H., Deng, L., Bai, C., Zhang, X., Wang, S., y Li, N. (2019). Experimental physical properties of an eco-friendly bio-insulation material based on wheat straw for buildings. *Energy and Buildings*, 201, 19-36. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.07.037>
- Liu, S., Ge, H., Zou, Y., y Chen, J. (2019). Glutaraldehyde/polyvinyl alcohol cross-linked nanosphere modified corn stalk reinforced polypropylene composite. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 472(1), 012064. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/472/1/012064>
- *Liu, Y., y Li, J. (2013). Test research of thermal insulation property of straw-based board. *Advanced Materials Research*, 671-674, 1848-1851. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.671-674.1848>
- *Liuzzi, S., Rubino, C., Martellotta, F., Stefanizzi, P., Casavola, C., y Pappalettera, G. (2020a). Characterization of biomass-based materials for building applications: The case of straw and olive tree waste. *Industrial Crops and Products*, 147, 112229. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112229>
- *Liuzzi, S., Rubino, C., Stefanizzi, P., y Martellotta, F. (2020b). Performance characterization of broad band sustainable sound absorbers made of almond skins. *Materials*, 13(23), 5474. <https://doi.org/10.3390/ma13235474>
- *Liuzzi, S., Rubino, C., Stefanizzi, P., Petrella, A., Boghetich, A., Casavola, C., y Pappalettera, G. (2018). Hygrothermal properties of clayey plasters with olive fibers. *Construction and Building Materials*, 158, 24-32. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.013>
- Liuzzi, S., Sanarica, S., y Stefanizzi, P. (2017). Use of agro-wastes in building materials in the Mediterranean area: A review. *Energy Procedia*, 126, 242-249. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.147>
- López-Zaldívar, O., Lozano-Díez, R., Herrero del Cura, S., Mayor-Lobo, P., y Hernández-Olivares, F. (2017). Effects of water absorption on the microstructure of plaster with end-of-life tire rubber mortars. *Construction and Building Materials*, 150, 558-567. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.014>

- *Luthra, P., Singh, R., y Kapur, G. S. (2019). Development of polypropylene/banana peel (treated and untreated) composites with and without compatibilizer and their studies. *Materials Research Express*, 6(9), 095313. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab2eea>
- Maderuelo-Sanz, R., Barrigón Morillas, J. M., Martín-Castizo, M., Gómez Escobar, V., y Rey Gozalo, G. (2013). Acoustical performance of porous absorber made from recycled rubber and polyurethane resin. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 10(3), 585-600. <https://doi.org/10.1590/S1679-78252013000300008>
- *Mahieu, A., Alix, S., y Leblanc, N. (2019). Properties of particleboards made of agricultural by-products with a classical binder or self-bound. *Industrial Crops and Products*, 130, 371-379. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.12.094>
- *Mahieu, A., Vivet, A., Poilane, C., y Leblanc, N. (2021). Performance of particleboards based on annual plant byproducts bound with bio-adhesives. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 107, 102847. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2021.102847>
- *Markiewicz, E., Slawomir, B., y Dominik, P. (2009). Polypropylene-lignocellulosic material composites as promising sound absorbing materials. *Polymer*, 54(6), 430-435.
- *Marques, B., António, J., Almeida, J., Tadeu, A., de Brito, J., Dias, S., Pedro, F., y Sena, J. D. (2020a). Vibro-acoustic behaviour of polymer-based composite materials produced with rice husk and recycled rubber granules. *Construction and Building Materials*, 264, 120221 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120221>
- *Marques, B., Tadeu, A., Almeida, J., António, J., y de Brito, J. (2020b). Characterisation of sustainable building walls made from rice straw bales. *Journal of Building Engineering*, 28, 101041. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.101041>
- *Marques, B., Tadeu, A., António, J., Almeida, J., y de Brito, J. (2020c). Mechanical, thermal and acoustic behaviour of polymer-based composite materials produced with rice husk and expanded cork by-products. *Construction and Building Materials*, 239, 117851. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117851>
- *Martellotta, F., Cannavale, A., De Matteis, V., y Ayr, U. (2018). Sustainable sound absorbers obtained from olive pruning wastes and chitosan binder. *Applied Acoustics*, 141, 71-78. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.06.022>

- *Masri, T., Ounis, H., Sedira, L., Kaci, A., y Benchabane, A. (2018). Characterization of new composite material based on date palm leaflets and expanded polystyrene wastes. *Construction and Building Materials*, 164, 410-418. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.197>
- *Mati-Baouche, N., De Baynast, H., Lebert, A., Sun, S., Lopez-Mingo, C. J. S., Leclaire, P., y Michaud, P. (2014). Mechanical, thermal and acoustical characterizations of an insulating bio-based composite made from sunflower stalks particles and chitosan. *Industrial Crops and Products*, 58, 244-250. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.04.022>
- *Mati-Baouche, N., De Baynast, H., Michaud, P., Dupont, T., y Leclaire, P. (2016). Sound absorption properties of a sunflower composite made from crushed stem particles and from chitosan bio-binder. *Applied Acoustics*, 111, 179-187. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.04.021>
- *Mati-Baouche, N., de Baynast, H., Sun, S., Lebert, A., Petit, E., y Michaud, P. (2015). Polysaccharidic binders for the conception of an insulating agro-composite. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 78, 152-159. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.08.006>
- *Mayer-Laigle, C., Haurie Ibarra, L., Breyse, A., Palumbo, M., Mabilie, F., Lacasta Palacio, A. M., y Barron, C. (2021). Preserving the cellular tissue structure of maize pith through dry fractionation processes: A key point to use as insulating agro-materials. *Materials*, 14(18). <https://doi.org/10.3390/ma14185350>
- *Mendívil, M. A., Muñoz, P., Morales, M. P., Letelier, V., y Juárez, M. C. (2017). Grapevine shoots for improving thermal properties of structural fired clay bricks: new method of agricultural-waste valorization. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(8), 04017074. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001892](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001892)
- *Merli, F., Belloni, E., y Buratti, C. (2021). Eco-sustainable wood waste panels for building applications: influence of different species and assembling techniques on thermal, acoustic, and environmental performance. *Buildings*, 11(8), 361. <https://doi.org/10.3390/buildings11080361>
- McWilliams, A., Siegel, D., y Van Fleet, D. D. (2005). Scholarly journals as producers of knowledge: theory and empirical evidence based on data envelopment analysis. *Organizational Research Methods*, 8(2), 185-201. <https://doi.org/10.1177/1094428105275377>

- *Mintorogo, D. S., Widigdo, W. K., y Juniwati, A. (2015). Application of coconut fibres as outer eco-insulation to control solar heat radiation on horizontal concrete slab rooftop. *Procedia Engineering*, 125, 765-772. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.129>
- *Mirski, R., Dziurka, D., y Trociński, A. (2018). Insulation properties of boards made from long hemp (*Cannabis stiva* L.) Fibers. *BioResources*, 13(3), 6591-6599.
- *Mishra, S. P., y Nath, G. (2019). Study on thermo-acoustic insulating property of biocomposite. En *Indian Journal of Pure y Applied Physics*, 57, 427-432.
- *Mohammad, M., Nik Syukri, N. I. R., y Nuawi, M. Z. (2019). Sound properties investigation of date palm fiber. *Journal of Physics: Conference Series*, 1150(1), 012003. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1150/1/012003>
- *Munir, M. J., Kazmi, S. M. S., Gencil, O., Ahmad, M. R., y Chen, B. (2021). Synergistic effect of rice husk, glass and marble sludges on the engineering characteristics of eco-friendly bricks. *Journal of Building Engineering*, 42, 102484. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102484>
- *Muñoz, A. D., y Trotta, M. G. (2015). Design of a brick with sound absorption properties based on plastic waste sawdust. *IEEE Access*, 3, 1260-1271. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2015.2461536>
- *Muñoz, P., Mendivil, M. A., Letelier, V., y Morales, M. P. (2019). Thermal and mechanical properties of fired clay bricks made by using grapevine shoots as pore forming agent. Influence of particle size and percentage of replacement. *Construction and Building Materials*, 224, 639-658. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.066>
- Murray, A., Skene, K., y Haynes, K. (2017). The circular economy: An interdisciplinary exploration of the concept and application in a global context. *Journal of Business Ethics*, 140(3), 369-380. <https://doi.org/10.1007/s10551-015-2693-2>
- *Mutani, G., Azzolino, C., Macrì, M., y Mancuso, S. (2020). Straw buildings: A good compromise between environmental sustainability and energy-economic savings. *Applied Sciences*, 10(8), 28-58. <https://doi.org/10.3390/APP10082858>
- *Muthuraj, R., Lacoste, C., Lacroix, P., y Bergeret, A. (2019). Sustainable thermal insulation biocomposites from rice husk, wheat husk, wood fibers and textile waste fibers: Elaboration and performances evaluation. *Industrial Crops and Products*, 135,

238-245. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.04.053>

- *Navacerrada, M. A., Díaz, C., y Fernández, P. (2014). Characterization of a material based on short natural fique fibers. *BioResources*, 9(2), 3480-3496.
- *Negro, F., Cremonini, C., Disafa, R. Z., y Fringuellino, M. (2016). Development of framed poplar plywood for acoustic improvement. *Wood Research*, 61(1), 121-127.
- *Nemec, M., Igaz, R., Gergel, T., Danielhová, A., Ondrejka, V., Dristak, L., Gejdos, M., y Kminiak, R. (2019). Acoustic and thermophysical properties of insulation materials based on wood wool. *Akustica*, 33, 114-123.
- *Nguyen, D. M., Grillet, A.-C., Diep, T. M. H., Ha Thuc, C. N., y Woloszyn, M. (2017). Hygrothermal properties of bio-insulation building materials based on bamboo fibers and bio-glues. *Construction and Building Materials*, 155, 852-866. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.075>
- *Nguyen, D. M., Grillet, A. C., Bui, Q. B., Diep, T. M. H., y Woloszyn, M. (2018a). Building bio-insulation materials based on bamboo powder and bio-binders. *Construction and Building Materials*, 186, 686-698. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.153>
- *Nguyen, D. M., Grillet, A. C., Diep, T. M. H., Bui, Q. B., y Woloszyn, M. (2018b). Influence of thermo-pressing conditions on insulation materials from bamboo fibers and proteins based bone glue. *Industrial Crops and Products*, 111, 834-845. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.12.009>
- *Nguyen, T. T., Picandet, V., Carre, P., Lecompte, T., Amziane, S., y Baley, C. (2010). Effect of compaction on mechanical and thermal properties of hemp concrete. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 14(5), 545-560. <https://doi.org/10.1080/19648189.2010.9693246>
- *Niro, J. F. D. V. M., Kyriazopoulos, M., Bianchi, S., Mayer, I., Eusebio, D. A., Arboleda, J. R., Lanuzo, M. M., y Pichelin, F. (2016). Development of medium- and low-density fibreboards made of coconut husk and bound with tannin-based adhesives. *International Wood Products Journal*, 7(4), 208-214. <https://doi.org/10.1080/20426445.2016.1207039>
- *Normaswanna Tawasil, D., Aminudin, E., Shukor Lim, H. A., Zakaria, R., Bin Ahmad, H., Pau Chung, L., Wai Loan, L., Abdul Hamid, A. R., y Zaini Nik Soh, N. M. (2020). Time-lag analysis of potential waste materials as thermal insulation in tropical

- climate: a preliminary investigation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 498(1), 0-8. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/498/1/012100>
- *Novais, R. M., Senff, L., Carvalheiras, J., Lacasta, A. M., Cantalapiedra, I. R., y Labrincha, J. A. (2021). Simple and effective route to tailor the thermal, acoustic and hygrothermal properties of cork-containing waste derived inorganic polymer composites. *Journal of Building Engineering*, 42, 102501. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102501>
- *Oancea, I., Bujoreanu, C., Budescu, M., Benchea, M., y Grădinaru, C. M. (2018). Considerations on sound absorption coefficient of sustainable concrete with different waste replacements. *Journal of Cleaner Production*, 203, 301-312. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.273>
- *Or, K. H., Putra, A., y Selamat, M. Z. (2017). Oil palm empty fruit bunch fibres as sustainable acoustic absorber. *Applied Acoustics*, 119, 9-16. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.12.002>
- *Ostendorf, K., Ahrens, C., Beulshausen, A., Tayo, J. L. T., y Euring, M. (2021). On the feasibility of a pmdi-reduced production of wood fiber insulation boards by means of kraft lignin and ligneous canola hulls. *Polymers*, 13(7), 1088. <https://doi.org/10.3390/polym13071088>
- *Othmani, C., Taktak, M., Zein, A., Hentati, T., Elnady, T., Fakhfakh, T., y Haddar, M. (2016). Experimental and theoretical investigation of the acoustic performance of sugarcane wastes based material. *Applied Acoustics*, 109, 90-96. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.02.005>
- *Pachla, E. C., Silva, D. B., Stein, K. J., Marangon, E., y Chong, W. (2021). Sustainable application of rice husk and rice straw in cellular concrete composites. *Construction and Building Materials*, 283, 122770. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122770>
- Palacios, A., Cong, L., Navarro, M. E., Ding, Y., y Barreneche, C. (2019). Thermal conductivity measurement techniques for characterizing thermal energy storage materials – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 108, 32-52. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.03.020>
- *Paiva, A., Pereira, S., Sá, A., Cruz, D., Varum, H., y Pinto, J. (2012). A contribution to the thermal insulation performance characterization of corn cob particleboards. *Energy and Buildings*, 45, 274-279. <https://doi.org/10.1016/j.ENBUILD.2011.11.019>

- *Panyakaew, S., y Fotios, S. (2011). New thermal insulation boards made from coconut husk and bagasse. *Energy and Buildings*, 43(7), 1732-1739. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2011.03.015>
- *Parcesepe, E., De Masi, R. F., Lima, C., Mauro, G. M., Pecce, M. R., y Maddaloni, G. (2021). Assessment of mechanical and thermal properties of hemp-lime mortar. *Materials*, 14(4), 882. <https://doi.org/10.3390/ma14040882>
- *Park, J. H., Kang, Y., Lee, J., Chang, S. J., Wi, S., y Kim, S. (2019). Development of wood-lime boards as building materials improving thermal and moisture performance based on hygrothermal behavior evaluation. *Construction and Building Materials*, 204, 576-585. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.139>
- *Park, S.-H., Lee, M., Seo, P.-N., Kang, E.-C., y Kang, C.-W. (2020). Acoustical properties of wood fiberboards prepared with different densities and resin contents. *BioResources*, 15(3), 5291-5304.
- *Pásztor, Z., Börcsök, Z., y Tsalagkas, D. (2019). Density optimization for the manufacturing of bark-based thermal insulation panels. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 307(1), 012007. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/307/1/012007>
- *Pásztor, Z., Kókai, P., Adamik, P., Halász, K., y Börcsök, Z. (2021). Investigation of thermal insulation panels made of wood shavings. *Drewno*, 64(207), 73-86. <https://doi.org/10.12841/wood.1644-3985.357.11>
- *Pásztor, Z., Ronyecz Mohácsiné, I., y Börcsök, Z. (2017). Investigation of thermal insulation panels made of black locust tree bark. *Construction and Building Materials*, 147, 733-735. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.204>
- *Pavelek, M., y Adamová, T. (2019). Bio-waste thermal insulation panel for sustainable building construction in steady and unsteady-state conditions. *Materials*, 12(12), 2004. <https://doi.org/10.3390/ma12122004>
- *Pavelek, M., Prajer, M., y Trgala, K. (2018). Static and dynamic thermal characterization of timber frame/wheat (*Triticum Aestivum*) chaff thermal insulation panel for sustainable building construction. *Sustainability*, 10(7), 2363. <https://doi.org/10.3390/su10072363>
- *Pedreño-Rojas, M. A., Morales-Conde, M. J., Pérez-Gálvez, F., y Rodríguez-Liñán, C. (2017). Eco-efficient acoustic and thermal conditioning using false ceiling plates

- made from plaster and wood waste. *Journal of Cleaner Production*, 166, 690-705. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.077>
- *Pennacchio, R., Savio, L., Bosia, D., Thiebat, F., Piccablotto, G., Patrucco, A., y Fantucci, S. (2017). Fitness: Sheep-wool and hemp sustainable insulation panels. *Energy Procedia*, 111, 287-297. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.030>
- *Petrella, A., Spasiano, D., Liuzzi, S., Ayr, U., Cosma, P., Rizzi, V., Petrella, M., y Di Mundo, R. (2018). Use of cellulose fibers from wheat straw for sustainable cement mortars. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 8(3), 161-179. <https://doi.org/10.1080/21650373.2018.1534148>
- Perri, A., y Peruffo, E. (2016). Knowledge Spillovers from FDI: A critical review from the international business perspective. *International Journal of Management Reviews*, 18(1), 3-27. <https://doi.org/10.1111/ijmr.12054>
- Pervaiz, M., y Sain, M. M. (2003). Carbon storage potential in natural fiber composites. *Resources, Conservation and Recycling*, 39(4), 325-340. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(02\)00173-8](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(02)00173-8)
- Petrella, A., Spasiano, D., Liuzzi, S., Ayr, U., Cosma, P., Rizzi, V., Petrella, M., y Di Mundo, R. (2018). Use of cellulose fibers from wheat straw for sustainable cement mortars. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 8(3), 161-179. <https://doi.org/10.1080/21650373.2018.1534148>
- Philip, S., y Rakendu, R. (2020). Thermal insulation materials based on water hyacinth for application in sustainable buildings. *Materials Today: Proceedings*, 33, 3803-3809. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.219>
- *Piégay, C., Glé, P., Gourdon, E., Gourlay, E., y Marceau, S. (2018). Acoustical model of vegetal wools including two types of fibers. *Applied Acoustics*, 129, 36-46. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.06.021>
- *Pinto, J., Cruz, D., Paiva, A., Pereira, S., Tavares, P., Fernandes, L., y Varum, H. (2012a). Characterization of corn cob as a possible raw building material. *Construction and Building Materials*, 34, 28-33. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2012.02.014>
- *Pinto, J., Paiva, A., Varum, H., Costa, A., Cruz, D., Pereira, S., Fernandes, L., Tavares, P., y Agarwal, J. (2011). Corn's cob as a potential ecological thermal insulation material. *Energy and Buildings*, 43(8), 1985-1990. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2011.04.004>

- *Pinto, J., Vieira, B., Pereira, H., Jacinto, C., Vilela, P., Paiva, A., Pereira, S., Cunha, V. M. C. F., y Varum, H. (2012b). Corn cob lightweight concrete for non-structural applications. *Construction and Building Materials*, 34, 346-351. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2012.02.043>
- *Pisello, A. L., Fabiani, C., Makaremi, N., Castaldo, V. L., Cavalaglio, G., Nicolini, A., Barbanera, M., y Cotana, F. (2016). Sustainable new brick and thermo-acoustic insulation panel from mineralization of stranded driftwood residues. *Energies*, 9(8), 619. <https://doi.org/10.3390/en9080619>
- Podsakoff, P. M., MacKenzie, S. B., Bachrach, D. G., y Podsakoff, N. P. (2005). The influence of management journals in the 1980s and 1990s. *Strategic Management Journal*, 26(5), 473-488. <https://doi.org/10.1002/smj.454>
- *Prabhakaran, S., Krishnaraj, V., Senthil Kumar, M., y Zitoune, R. (2014). Sound and vibration damping properties of flax fiber reinforced composites. *Procedia Engineering*, 97, 573-581. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.285>
- *Prabhakaran, S., Krishnaraj, V., Shankar, K., Senthilkumar, M., y Zitoune, R. (2019). Experimental investigation on impact, sound, and vibration response of natural-based composite sandwich made of flax and agglomerated cork. *Journal of Composite Materials*, 54(5), 669-680. <https://doi.org/10.1177/0021998319871354>
- Pramreiter, M., Nenning, T., Huber, C., Müller, U., Kromoser, B., Mayencourt, P., y Konnerth, J. (2023). A review of the resource efficiency and mechanical performance of commercial wood-based building materials. *Sustainable Materials and Technologies*, 38(October), e00728. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2023.e00728>
- *Quiñones-Bolaños, E., Gómez-Oviedo, M., Mouthon-Bello, J., Sierra-Vitola, L., Berardi, U., y Bustillo-Lecompte, C. (2021). Potential use of coconut fibre modified mortars to enhance thermal comfort in low-income housing. *Journal of Environmental Management*, 277, 111503. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111503>
- *Quintana-Gallardo, A., Romero Clausell, J., Guillén-Guillamón, I., y Mendiguchia, F. A. (2021). Waste valorization of rice straw as a building material in Valencia and its implications for local and global ecosystems. *Journal of Cleaner Production*, 318, 128507. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128507>
- Rabbat, C., Awad, S., Villot, A., Rollet, D., y Andrés, Y. (2022). Sustainability of bio-mass-based insulation materials in buildings: Current status in France, end-of-life projections and energy recovery potentials. *Renewable and Sustainable Energy*

- Reviews*, 156, 111962. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111962>
- RAE. (2023). Definición de biomasa. <https://dle.rae.es/biomasa>
- *Raj, M., Fatima, S., y Tandon, N. (2020a). A study of areca nut leaf sheath fibers as a green sound-absorbing material. *Applied Acoustics*, 169, 107490. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107490>
- *Raj, M., Fatima, S., y Tandon, N. (2020b). Recycled materials as a potential replacement to synthetic sound absorbers: A study on denim shoddy and waste jute fibers. *Applied Acoustics*, 159, 107070. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.107070>
- *Ramis, J., Alba, J., del Rey, R., Escuder, E., y Sanchís, V. J. (2010). New absorbent material acoustic based on kenaf's fibre. *Materiales de Construcción*, 60(299), 133-143. <https://doi.org/10.3989/MC.2010.50809>
- Ramlee, N. A., Naveen, J., y Jawaid, M. (2021). Potential of oil palm empty fruit bunch (OPEFB) and sugarcane bagasse fibers for thermal insulation application – A review. *Construction and Building Materials*, 271, 121519. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121519>
- Rana, A., y Bandyopadhyay, S. (2013). Development and application of biocomposites from rebewable resources. En Thakur, V., y Singha, A. (Eds.), *Biomass-based Bio-Composites*. Smithers Rapra Technology Ltd.
- *Rao, S., Jayaraman, K., y Bhattacharyya, D. (2011). Short fibre reinforced cores and their sandwich panels: Processing and evaluation. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42(9), 1236-1246. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESA.2011.05.006>
- Raut, S. P., Ralegaonkar, R. V., y Mandavgane, S. A. (2011). Development of sustainable construction material using industrial and agricultural solid waste: A review of waste-create bricks. *Construction and Building Materials*, 25(10), 4037-4042. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.038>
- Ravandi, M. R. G., Mardi, H., Langari, A. A. A., Mohammadian, M., y Khanjani, N. (2015). A review on the acoustical properties of natural and synthetic noise absorbents. *OALib*, 02(08), 1-11. <https://doi.org/10.4236/oalib.1101598>
- Ricciardi, P., Cillari, G., Carnevale Miino, M., y Collivignarelli, M. C. (2020). Valorization of agro-industry residues in the building and environmental sector: A review. *Waste Management and Research*, 38(5), 487-513. <https://doi.org/10.1177/0734242X20904426>

- *Ricciardi, P., Belloni, E., Merli, F., y Buratti, C. (2021). Sustainable panels made with industrial and agricultural waste: Thermal and environmental critical analysis of the experimental results. *Applied Sciences*, 11(2), 494. <https://doi.org/10.3390/app11020494>
- *Robert, U. W., Etuk, S. E., Umoren, G. P., y Agbasi, O. E. (2019). Assessment of Thermal and mechanical properties of composite board produced from coconut (*Cocos nucifera*) husks, waste newspapers, and cassava starch. *International Journal of Thermophysics*, 40(9), 83. <https://doi.org/10.1007/s10765-019-2547-8>
- *Rojas, C., Cea, M., Iriarte, A., Valdés, G., Navia, R., y Cárdenas-R, J. P. (2019). Thermal insulation materials based on agricultural residual wheat straw and corn husk biomass, for application in sustainable buildings. *Sustainable Materials and Technologies*, 20, e00102. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2019.e00102>
- *Sabapathy, K. A., y Gedupudi, S. (2019). Straw bale based constructions: Measurement of effective thermal transport properties. *Construction and Building Materials*, 198, 182-194. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.256>
- *Sable, I., Grinfelds, U., Vikele, L., Rozenberga, L., Zeps, M., y Luguza, S. (2015). Thermal insulation from hardwood residues. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 96(1), 12027. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/96/1/012027>
- Sáez-Pérez, M. P., Brümmer, M., y Durán-Suárez, J. A. (2020). A review of the factors affecting the properties and performance of hemp aggregate concretes. *Journal of Building Engineering*, 31, 101323. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101323>
- *Sair, S., Mansouri, S., Tanane, O., Abboud, Y., y El Bouari, A. (2019). Alfa fiber-polyurethane composite as a thermal and acoustic insulation material for building applications. *SN Applied Sciences*, 1(7), 667. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0685-z>
- Sağlam, S., Güzelçimen, F., Bingöl, D., Özkan, U. Y., y Ekici, B. (2022). An Evaluation on acoustic behavior of untreated tree trunks depending on bark physical properties and fiber cell structure. *Journal of Natural Fibers*, 19(4), 1507-1521. <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1779901>
- *Sakhare, V., Raut, S., y Ralegaonkar, R. (2015). Performance assessment of sustainable composite roofing assemblies using experimentation. *Procedia Engineering*, 118, 268-275. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.426>

- *Salas-Ruiz, A., y Barbero-Barrera, M. del M. (2019). Performance assessment of water hyacinth–cement composite. *Construction and Building Materials*, 211, 395-407. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.217>
- *Salas-Ruiz, A., del Mar Barbero-Barrera, M., y Ruiz-Téllez, T. (2019). Microstructural and thermo-physical characterization of a water hyacinth petiole for thermal insulation particle board manufacture. *Materials*, 12(4), 560. <https://doi.org/10.3390/ma12040560>
- *Saleh, A., Ige, H. O., Akande, F. B., Yunusa, S. U., y Atiku, M. M. (2020). Potential of using agricultural waste (orange peel) and empty water sachets/bags in the production of sound absorption panel. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 445(1), 012038. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/445/1/012038>
- *Samaei, S. E., Berardi, U., Soltani, P., y Taban, E. (2021a). Experimental and modeling investigation of the acoustic behavior of sustainable kenaf/yucca composites. *Applied Acoustics*, 183, 108332. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108332>
- *Samaei, S. E., Taban, E., Berardi, U., Mousavi, S. M., Faridan, M., y Hassan, A. (2021b). Optimization and modeling of sound-absorption properties of natural fibers for acoustical application. *Journal of Natural Fibers*, 19(13), 7157-7173. <https://doi.org/10.1080/15440478.2021.1944429>
- *Sampathrajan, A., Vijayaraghavan, N. C., y Swaminathan, K. R. (1991). Acoustic aspects of farm residue-based particle boards. *Bioresource Technology*, 35, 67-71.
- *Samsudin, E. M., Ismail, L. H., Kadir, A. A., Salwa, S., y Mokdar, S. (2016). Comparison on acoustic performance between dust and coir form empty fruit bunches (EFB) as sound absorption material. *Jurnal Teknologi*, 78(5), 2180-3722.
- *Sánchez, G. F. G., López, R. E. G., y Gonzalez-Lezcano, R. A. (2021). Figue as a sustainable material and thermal insulation for buildings: Study of its decomposition and thermal conductivity. *Sustainability*, 13(13), 7484. <https://doi.org/10.3390/su13137484>
- *Santoni, A., Bonfiglio, P., Fausti, P., Marescotti, C., Mazzanti, V., Mollica, F., y Pompoli, F. (2019). Improving the sound absorption performance of sustainable thermal insulation materials: Natural hemp fibres. *Applied Acoustics*, 150, 279-289. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.02.022>

- *Sari, N. H., Wardana, I. N. G., Irawan, Y. S., y Siswanto, E. (2016). Physical and acoustical properties of corn husk fiber panels. *Advances in Acoustics and Vibration*, 2016, 5971814. <https://doi.org/10.1155/2016/5971814>
- *Sassoni, E., Manzi, S., Motori, A., Montecchi, M., y Canti, M. (2014). Novel sustainable hemp-based composites for application in the building industry: Physical, thermal and mechanical characterization. *Energy and Buildings*, 77, 219-226. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.03.033>
- *Savic, A., Antonijevic, D., Jelic, I., y Zakic, D. (2020). Thermomechanical behavior of bio-fiber composite thermal insulation panels. *Energy and Buildings*, 229, 110511. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110511>
- *Saw, S., Sarkhel, G., y Choudhury, A. (2015). Effect of layering pattern on the physical, mechanical and acoustic properties of luffa/coir fiber-reinforced epoxy novolac hybrid composites. En Thakur, V. K. (Ed.), *Lignocellulosic Polymer Composites: Processing, Characterization, and Properties* (pp. 369-384). John Wiley & Sons.
- Seddeq, H. S. (2009). Factors influencing acoustic performance of sound absorptive materials. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 3(4), 4610-4617.
- *Segovia, F., Blanchet, P., Auclair, N., y Essoua, G. G. E. (2020). Thermo-mechanical properties of a wood fiber insulation board using a bio-based adhesive as a binder. *Buildings*, 10(9), 1-15. <https://doi.org/10.3390/buildings10090152>
- *Sellers, T., Miller, G. D., y Fuller, M. J. (1993). Kenaf core as a board raw material. *Products Journal*, 43(7), 69-71.
- Silvestri, C., Silvestri, L., Forcina, A., Di Bona, G., y Falcone, D. (2021). Green chemistry contribution towards more equitable global sustainability and greater circular economy: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 294, 126137. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126137>
- *Sharma, S. K., Shukla, S. R., y Sethy, A. K. (2020). Acoustical behaviour of natural fibres-based composite boards as sound-absorbing materials. *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, 17(1), 66-72. <https://doi.org/10.1007/s13196-020-00255-z>
- Sharma, A., Singh, P. K., y Sharma, V. K. (2021). Analysis on WH cement composite thermal insulation material for increasing efficiency of building. *Materials Today: Proceedings*, 45, 3036-3041. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.056>
- *Sierra-Pérez, J., Boschmonart-Rives, J., Dias, A. C., y Gabarrell, X. (2016). Environmental

- implications of the use of agglomerated cork as thermal insulation in buildings. *Journal of Cleaner Production*, 126, 97-107. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.146>
- Singh, I., Baipai, P., y Dhawan, V. (2013). Primary and secondary processing of biocomposites. En V. Thakur y A. Singha (Eds.), *Biomass-based composites* (pp- 61-85). Smithers Rapra Technology Ltd.
- *Sinka, M., Sahmenko, G., Korjakins, A., Radina, L., y Bajare, D. (2015). Hemp thermal insulation concrete with alternative binders, analysis of their thermal and mechanical properties. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 96(1), 012029. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/96/1/012029>
- *Smardzewski, J., Kamisiński, T., Dziurka, D., Mirski, R., Majewski, A., Flach, A., y Pilch, A. (2015). Sound absorption of wood-based materials. *Holzforschung*, 69(4), 431-439. <https://doi.org/10.1515/hf-2014-0114>
- *Soltani, P., Taban, E., Faridan, M., Samaei, S. E., y Amininasab, S. (2020). Experimental and computational investigation of sound absorption performance of sustainable porous material: Yucca Gloriosa fiber. *Applied Acoustics*, 157, 106999. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.106999>
- *Somé, S. C., Ben Fraj, A., Pavoine, A., y Hajj Chehade, M. (2018). Modeling and experimental characterization of effective transverse thermal properties of hemp insulation concrete. *Construction and Building Materials*, 189, 384-396. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.210>
- *Son, N. K., Toan, N. P. A., Dung, T. T. T., y Huynh, N. N. T. (2017). Investigation of agro-concrete using by-products of rice husk in Mekong Delta of Vietnam. *Procedia Engineering*, 171, 725-733. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.421>
- Song, H. Y., Cheng, X. X., y Chu, L. (2013). Effect of density and ambient temperature on coefficient of thermal conductivity of heat-insulated EPS and PU materials for food packaging. *Applied Mechanics and Materials*, 469, 152-155. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.469.152>
- *Srisuwan, A., Phonphuak, N., y Saengthong, C. (2018). Improvement of thermal insulating properties and porosity of fired clay bricks with addition of agricultural wastes. *Suranaree Journal of Science & Technoly*, 25(1), 49-58.
- *Srivaro, S., Chaowana, P., Matan, N., y Kyokong, B. (2014). Lightweight sandwich panel

- from oil palm wood core and rubberwood veneer face. *Journal of Tropical Forest Science*, 26(1), 50-57.
- *Suhawati, I., Shamsul, K., Ismaliza, I., y Kamarudin, A. M. (2013). Sound absorption analysis of foamed rubber composites from kenaf and calcium carbonate. *Journal of Rubber Research*, 16(1), 36-44.
- Švajlenka, J., y Pošiváková, T. (2023). Innovation potential of wood constructions in the context of sustainability and efficiency of the construction industry. *Journal of Cleaner Production*, 411, 137209. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137209>
- *Taban, E., Amininasab, S., Mehrzad, S., Fattahi, M., Tajik, L., y Samaei, S. E. (2021a). Comparison of experimental and empirical approaches for determination of sound absorption properties of bagasse and cornhusk fibers. *Journal of Natural Fibers*, 19(14), 9024-9038. <https://doi.org/10.1080/15440478.2021.1982108>
- *Taban, E., Amininasab, S., Soltani, P., Berardi, U., Abdi, D. D., y Samaei, S. E. (2021b). Use of date palm waste fibers as sound absorption material. *Journal of Building Engineering*, 41, 102752. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102752>
- *Taban, E., Khavanin, A., Faridan, M., Samaei, S. E., Samimi, K., y Rashidi, R. (2020a). Comparison of acoustic absorption characteristics of coir and date palm fibers: Experimental and analytical study of green composites. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 17(1), 39-48. <https://doi.org/10.1007/s13762-019-02304-8>
- *Taban, E., Khavanin, A., Ohadi, A., Putra, A., Jafari, A. J., Faridan, M., y Soleimanian, A. (2019). Study on the acoustic characteristics of natural date palm fibres: Experimental and theoretical approaches. *Building and Environment*, 161, 106274. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106274>
- *Taban, E., Mirzaei, R., Faridan, M., Samaei, E., Salimi, F., Tajpoor, A., y Ghalenoei, M. (2020b). Morphological, acoustical, mechanical and thermal properties of sustainable green yucca (*Y. Gloriosa*) fibers: An exploratory investigation. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 18, 883-896. <https://doi.org/10.1007/s40201-020-00513-9> /Published
- *Taban, E., Soltani, P., Berardi, U., Putra, A., Mousavi, S., Faridan, M., Samaei, S., y Khavanin, A. (2020c). Measurement, modeling, and optimization of sound absorption performance of kenaf fibers for building applications. *Building and Environment*, 180, 107087. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107087>

- *Taban, E., Valipour, F., Abdi, D. D., y Amininasab, S. (2021c). Mathematical and experimental investigation of sound absorption behavior of sustainable kenaf fiber at low frequency. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 18(9), 2765-2780. <https://doi.org/10.1007/s13762-020-03024-0>
- *Tahira Elias-Ozkan, S., y Summers, F. (2013). Thermal performance of three different strawbale buildings at the kerkenes eco-center. *Journal of Green Building*, 8(4), 110-126.
- *Tămaş-Gavrea, D.-R., Iştoan, R., Tiuc, A. E., Dénes, T.-O., Vasile, O., y Constantinescu, H. (2021). Development of new composite products based on flax fibres. *Coatings*, 11(5), 551. <https://doi.org/10.3390/coatings11050551>
- Tan, B. K., Ching, Y. C., Poh, S. C., Abdullah, L. C., y Gan, S. N. (2015). A review of natural fiber reinforced poly(vinyl alcohol) based composites: Application and opportunity. *Polymers*, 7(11), 2205-2222. <https://doi.org/10.3390/polym7111509>
- *Tao, Y., Li, P., y Cai, L. (2016). Effect of fiber content on sound absorption, thermal conductivity, and compression strength of straw fiber-filled rigid polyurethane foams. *BioResources*, 11(2), 4159-4167.
- *Teslík, J., Labudek, J., Valová, B., y Vodičková, M. (2014a). Settlement of crushed straw. *Advanced Materials Research*, 1041, 55-58. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1041.55>
- *Teslík, J., Zdražilová, N., y Vodičková, M. (2014b). Airtightness and acoustic properties of family house from straw. *Advanced Materials Research*, 860-863, 1215-1218. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.860-863.1215>
- *Thilagavathi, G., Neela Krishnan, S., Muthukumar, N., y Krishnan, S. (2017). Investigations on sound absorption properties of luffa fibrous mats. *Journal of Natural Fibers*, 15(3), 445-451. <https://doi.org/10.1080/15440478.2017.1349016>
- *Tholkappiyan, E., Saravanan, D., Jagasthitha, R., Angeswari, T., y Surya, V. T. (2016). Prediction of acoustic performance of banana fiber-reinforced recycled paper pulp composites. *Journal of Industrial Textiles*, 45(6), 1350-1363. <https://doi.org/10.1177/1528083714559569>
- Tie, T. S., Mo, K. H., Putra, A., Loo, S. C., Alengaram, U. J., y Ling, T.-C. (2020). Sound absorption performance of modified concrete: A review. *Journal of Building Engineering*, 30, 101219. <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101219>

- *Tiuc, A. E., Nemeş, O., Vermeşan, H., y Toma, A. C. (2019). New sound absorbent composite materials based on sawdust and polyurethane foam. *Composites Part B: Engineering*, 165, 120-130. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.11.103>
- Tranfield, D., Denyer, D., y Smart, P. (2003). Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review. *British Journal of Management*, 14, 207-222.
- Trematerra, A., y Lombardi, I. (2017). Acoustic properties of cellulose. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 225, 012082. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/225/1/012082>
- Trivedi, N. S., Mandavgane, S. A., y Chaurasia, A. (2018). Characterization and valorization of biomass char: A comparison with biomass ash. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(4), 3458-3467. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0689-4>
- *Tsalagkas, D., Börcsök, Z., y Pásztory, Z. (2019). Thermal, physical and mechanical properties of surface overlaid bark-based insulation panels. *European Journal of Wood and Wood Products*, 77(5), 721-730. <https://doi.org/10.1007/s00107-019-01436-5>
- *Tudor, E. M., Dettendorfer, A., Kain, G., Barbu, M. C., Réh, R., y Krišťák, Ľ. (2020). Sound-Absorption Coefficient of Bark-Based Insulation Panels. *Polymers*, 12(5), 1012. <https://doi.org/10.3390/polym12051012>
- *Tudor, E. M., Kristak, L., Barbu, M. C., Gergel', T., Němec, M., Kain, G., y Réh, R. (2021). Acoustic properties of larch bark panels. *Forests*, 12(7), 887. <https://doi.org/10.3390/f12070887>
- *Tůmová, E., Drochytka, R., Černý, V., y Čada, P. (2017). Development of organic and biodegradable insulating material for ETICS. *Procedia Engineering*, 195, 81-87. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.527>
- United Nations. (2010). Proyecto de protocolo de la Convención presentado por Granada para su aprobación por la Conferencia de las Partes en su 16º período de sesiones. 61115.
- United Nations. (2016). Informe de la Conferencia de las Partes sobre su 21^{er} período de sesiones, celebrado en París del 30 de noviembre al 13 de diciembre de 2015. 01192. <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/10a01.pdf>
- *Udoeyo, F. F., Anyanwu, C. I. O., Brooks, R., y Udo-Inyang, P. (2011). Properties of palm nut fiber-reinforced cement composite containing pulverized kernel shell as

- supplementary material. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(4), 378-384. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000178](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000178)
- *Usubharatana, P., y Phungrassami, H. (2019). Life cycle assessment of bio-based thermal insulation materials formed by different methods. *Environmental Engineering and Management Journal*, 18(7), 1471-1486.
- *Vahnina, T. N., Susoeva, I. V., y Titunin, A. A. (2018). Thermal-insulation boards from fibrous plant wastes and urea-formaldehyde binder. *Magazine of Civil Engineering*, 83(7), 136-147. <https://doi.org/10.18720/MCE.83.13>
- Vanegas Pérez, G., Barbosa González, A., y Pedraza Manuel, G. (2017). Revisión bibliográfica sobre el tratamiento sistémico y cognitivo conductual del trastorno límite de personalidad. *Informes psicológicos*, 17(2), 159-176. <https://doi.org/10.18566/infpsic.v17n2a09>
- *Vasilache, M., Pruteanu, M., y Avram, C. (2010). Use of waste materials for thermal insulation in buildings. *Environmental Engineering and Management Journal*, 9(9), 1275-1280. <https://doi.org/10.30638/eemj.2010.165>
- *Vasile, O., Miculescu, F., Voicu, Ș. I., Vasile, O., Miculescu, F., y Voicu, S. I. (2012). Correlation aspects between morphology, infrared and acoustic absorptions properties of various materials. *Optoelectronics and Advanced Materials-Rapid Communications*, 6(6), 631-638.
- *Vidil, L., Fiorelli, J., Bilba, K., Onésippe, C., Arsène, M. A., y Savastano, H. (2016). Thermal insulating particle boards reinforced with coconut leaf sheaths. *Green Materials*, 4(1), 31-40. <https://doi.org/10.1680/jgrma.15.00029>
- *Viel, M., Collet, F., y Lanos, C. (2019a). Development and characterization of thermal insulation materials from renewable resources. *Construction and Building Materials*, 214, 685-697. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.139>
- *Viel, M., Collet, F., y Lanos, C. (2020). Effect of compaction on multi-physical properties of hemp-black liquor composites. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(2), 2487-2494. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.12.079>
- *Viel, M., Collet, F., Prétot, S., y Lanos, C. (2019b). Hemp-straw composites: Gluing study and multi-physical characterizations. *Materials*, 12(8), 1199. <https://doi.org/10.3390/ma12081199>
- *Vitale, M., Barbero-Barrera, M. D. M., y Cascone, S. M. (2021). Thermal, physical and

- mechanical performance of orange peel boards: A new recycled material for building application. *Sustainability*, 13(14), 7945. <https://doi.org/10.3390/su13147945>
- *Volf, M., Diviš, J., y Havlík, F. (2015). Thermal, moisture and biological behaviour of natural insulating materials. *Energy Procedia*, 78, 1599-1604. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.219>
- Vox, G., Blanco, I., y Schettini, E. (2018). Green façades to control wall surface temperature in buildings. *Building and Environment*, 129, 154-166. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.12.002>
- Walia, U., Kaur, M., y Gupta, R. (2023). Impact of biobased materials on human health. En Ahmed, S., y Annu (Eds.), *Advanced Applications of Biobased Materials* (pp. 505-531). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91677-6.00014-3>
- Wang, C., Wang, J., y Norbäck, D. (2022). A systematic review of associations between energy use, fuel poverty, energy efficiency improvements and health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(12), 7393. <https://doi.org/10.3390/ijerph19127393>
- *Wang, D., Min Peng, L., Fu, F., Qi Song, B., y Hong Liu, M. (2017). Changes of microscopic structures and sound absorption properties of decayed wood. *Wood Research*, 62(4), 529-538.
- Wang, H., Chiang, P.-C., Cai, Y., Li, C., Wang, X., Chen, T.-L., Wei, S., y Huang, Q. (2018). Application of wall and insulation materials on green building: A review. *Sustainability*, 10(9), 3331. <https://doi.org/10.3390/su10093331>
- Wang, Y. (2011). Research on the revival application of wooden building with the properties of anti-seismic energy-saving and environment protection. *Advanced Materials Research*, 255-260, 1551-1557. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.255-260.1551>
- *Wegerer, P., Nackler, J. N., y Bednar, T. (2015). Measuring the hygrothermal performance of an interior insulation made of woodfibre boards. *Energy Procedia*, 78, 1478-1483. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.173>
- *Wei, K., Lv, C., Chen, M., Zhou, X., Dai, Z., y Shen, D. (2015). Development and performance evaluation of a new thermal insulation material from rice straw using high frequency hot-pressing. *Energy and Buildings*, 87, 116-122. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.026>

- *Wimmers, G., Klick, J., Tackaberry, L., Zwiesigk, C., Egger, K., y Massicotte, H. (2019). Fundamental studies for designing insulation panels from wood shavings and filamentous fungi. *BioResources*, 14(3), 5506-5520.
- *Wu, Q., Andersson, R. L., Holgate, T., Johansson, E., Gedde, U. W., Olsson, R. T., y Hedenqvist, M. S. (2014). Highly porous flame-retardant and sustainable biofoams based on wheat gluten and in situ polymerized silica. *Journal of Materials Chemistry A*, 2(48), 20996-21009. <https://doi.org/10.1039/c4ta04787g>
- *Xu, J., Sugawara, R., Widyorini, R., Han, G., y Kawai, S. (2004). Manufacture and properties of low-density binderless particleboard from kenaf core. *Journal of Wood Science*, 50(1), 62-67. <https://doi.org/10.1007/s10086-003-0522-1>
- *Xu, Z., Chen, Z., y Yang, S. (2018). Seismic behavior of cold-formed steel high-strength foamed concrete shear walls with straw boards. *Thin-Walled Structures*, 124, 350-365. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.12.032>
- *Yang, H.-S., Kim, D.-J., y Kim, H.-J. (2003). Rice straw-wood particle composite for sound absorbing wooden construction materials. *Bioresource Technology*, 86(2), 117-121. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(02\)00163-3](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(02)00163-3)
- Yang, J. (2004). Theory of thermal conductivity. En Tritt, T. M. (Ed.), *Thermal Conductivity Theory, Properties, and Applications* (pp. 1-20). Springer US. <https://doi.org/10.1007/b136496>
- *Yang, Z. (2017). Study on application of concrete sandwich insulation material in library building insulation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 207(1), 012094. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/207/1/012094>
- *Yao, J., Ma, L., Lua, W., Jiang, L., y Li, Y. (2012a). Acoustic absorption performance research of coir density board. *Advanced Materials Research*, 549, 589-592. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.549.589>
- *Yao, J., Hu, Y., y Lu, W. (2012b). Performance research on coir fiber and wood debris hybrid boards. *BioResources*, 7(3), 4262-4272.
- *Yeon, J. O., y Kim, K. W. (2014). Analysis of absorption coefficient for eco-friendly acoustical absorbers. *Advanced Materials Research*, 831, 58-61. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.831.58>
- Ying, C., Wang, W., Yu, J., Li, Q., Yu, D., y Liu, J. (2023). Deep learning for renewable energy forecasting: A taxonomy, and systematic literature review. *Journal of Cleaner*,

384, 135414. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135414>

- *Yoon, J., Kim, H., Koh, T., y Pyo, S. (2020). Microstructural characteristics of sound absorbable porous cement-based materials by incorporating natural fibers and aluminum powder. *Construction and Building Materials*, 243, 118167. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118167>
- *Yu, Z., Xiao, Y., Tian, H., Liu, S., Zeng, J., y Luo, X. (2019). Bagasse as functional fillers to improve and control biodegradability of soy oil-based rigid polyurethane foams. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 36(10), 1740-1745. <https://doi.org/10.1007/s11814-019-0349-0>
- *Zach, J., Hroudová, J., y Korjenic, A. (2016a). Environmentally efficient thermal and acoustic insulation based on natural and waste fibers. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 91(8), 2156-2161. <https://doi.org/10.1002/jctb.4940>
- Zach, J., Korjenic, A., Petránek, V., Hroudová, J., y Bednar, T. (2012). Performance evaluation and research of alternative thermal insulations based on sheep wool. *Energy and Buildings*, 49, 246-253. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.02.014>
- *Zach, J., Slávik, R., y Novák, V. (2016b). Investigation of the process of heat transfer in the structure of thermal insulation materials based on natural fibres. *Procedia Engineering*, 151, 352-359. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.389>
- *Zhang, J., Khatibi, A. A., Castanet, E., Baum, T., Komeily-Nia, Z., Vroman, P., y Wang, X. (2019). Effect of natural fibre reinforcement on the sound and vibration damping properties of bio-composites compression moulded by nonwoven mats. *Composites Communications*, 13, 12-17. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2019.02.002>
- *Zhang, S.-Y., Li, Y.-Y., Wang, C.-G., y Wang, X. (2017). Thermal insulation boards from bamboo paper sludge. *BioResources*, 12(1), 56-67.
- Zhang, X., Li, L., y Xu, F. (2022). Chemical characteristics of wood cell wall with an emphasis on ultrastructure: A mini-review. *Forests*, 13(3), 439. <https://doi.org/10.3390/f13030439>
- *Zhang, X., Chen, B., y Riaz Ahmad, M. (2021). Characterization of a novel bio-insulation material for multilayer wall and research on hysteresis effect. *Construction and Building Materials*, 290, 123162. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123162>
- Zhao, J. R., Zheng, R., Tang, J., Sun, H. J., y Wang, J. (2022). A mini-review on building insulation materials from perspective of plastic pollution: Current issues and

natural fibres as a possible solution. *Journal of Hazardous Materials*, 438, 129449.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129449>

Zheng, Y., Wang, J., y Wang, A. (2021). Recent advances in the potential applications of hollow kapok fiber-based functional materials. *Cellulose*, 28(9), 5269-5292.
<https://doi.org/10.1007/s10570-021-03834-6>

*Zhou, X., Zheng, F., Li, H., y Lu, C.. (2010). An environment-friendly thermal insulation material from cotton stalk fibers. *Energy and Buildings*, 42(7), 1070-1074.
<https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2010.01.020>

*Zou, S., Li, H., Wang, S., Jiang, R., Zou, J., Zhang, X., Liu, L., y Zhang, G. (2020). Experimental research on an innovative sawdust biomass-based insulation material for buildings. *Journal of Cleaner Production*, 260, 121029.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121029>

*Zou, Y., Xu, H., y Yang, Y. (2010). Lightweight Polypropylene Composites Reinforced by Long Switchgrass Stems. *Journal of Polymers and the Environment*, 18(4), 464-473.
<https://doi.org/10.1007/S10924-010-0165-4>



CAPÍTULO 3

**MATERIALES, PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES Y
CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA**

Resumen del capítulo

En este capítulo se describen los materiales y métodos experimentales utilizados en el desarrollo de esta tesis doctoral. Primero se describe la biomasa empleada: el jacinto de agua (*eichhornia crassipes*) y su proceso de acondicionamiento desde su recolección a orillas del río Guadiana hasta la obtención de la materia prima utilizada para desarrollar los materiales que han sido objeto de estudio en este trabajo. Se describen asimismo los diferentes materiales constructivos y aglutinantes que fueron mezclados con el jacinto de agua para obtener los materiales compuestos. A continuación, se describe el proceso de desarrollo de los materiales, desde el diseño y desarrollo de los moldes empleados para la preparación de las muestras hasta los materiales y equipos empleados para la obtención de las muestras, especificando las variables que se han tenido en cuenta en cada bloque experimental. Posteriormente, se detallan las técnicas de caracterización y los procedimientos normalizados que se han empleado para la caracterización y estudio de las muestras preparadas y se explica brevemente la metodología seguida para realizar la simulación del comportamiento térmico de los materiales con el *software CYPEtherm*. Finalmente, se presentan y discuten los resultados de los análisis físico-químicos de las muestras preparadas.

CONTENIDO

3.1. INTRODUCCIÓN	109
3.2. MATERIALES.....	111
3.2.1 Tallo de Jacinto de agua (Eichhornia Crassipes)	111
3.2.2 Otros materiales	112
3.3. PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES.....	115
3.3.1 Diseño y desarrollo de los moldes.....	115
3.3.2 Preparación de las muestras.....	120
3.4. TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN.....	123
3.4.1 Análisis de la materia prima.....	123
3.4.2 Análisis fisico-químico de las muestras.....	124
3.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	128
3.5.1 Análisis Físico-Químico de la materia prima.....	128
3.5.2 Análisis de las muestras.....	131
3.6. SIMULACIÓN DE EFICIENCIA ENERGÉTICA	137
3.7. CONCLUSIONES	140
REFERENCIAS	141

3.1. INTRODUCCIÓN

El material principal de este trabajo de investigación y sobre el que gira todo este proyecto es el *eichhornia crassipes*, también conocido como camalote o jacinto de agua, que es una planta acuática originaria de Sudamérica y que está incluida en el Catálogo español de especies exóticas invasoras según el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) del Gobierno de España y en el listado de la Unión Europea (UE) de especies exóticas invasoras preocupantes (MITECO, 2019). Según las fuentes consultadas, esta planta se ha extendido desde Sudamérica a otras zonas, especialmente tropicales o subtropicales (Capdevila-Argüelles et al., 2011). La primera cita bibliográfica de la aparición de esta planta en Europa data de 1939, en Portugal (cuenca del río Sado) (Téllez et al., 2008). En España, la aparición de esta planta data de 1989, cuando apareció de forma escasa y más o menos esporádicamente entre los paralelos 36° y 43°N, formando pequeñas poblaciones localizadas que desaparecieron al secarse las charcas o humedales en las que se habían detectado (Téllez et al., 2008). Los mayores daños provocados por esta planta invasora en España han ocurrido en el curso del río Guadiana, en el suroeste de la Península Ibérica, debido a su rápida expansión. En otoño de 2004, se detectó un gran crecimiento de esta planta en el río Guadiana, y aunque sufrió una marcada recesión durante el invierno, en abril de 2005 se produjo una fuerte regeneración de los fragmentos que habían quedado en las orillas (Téllez et al., 2008). En el año 2016, el MITECO aprobó la primera versión de la “Estrategia de lucha para el control de la especie invasora *Eichhornia crassipes* en la cuenca del Guadiana”, cuyo objetivo principal era establecer las líneas de actuación futuras y una planificación para mejorar los trabajos de control y erradicación de la presencia de esta planta en dicha cuenca (MITECO, 2021). En diciembre de 2020, la Confederación Hidrográfica del Guadiana (CHDG), a través del Plan de choque iniciado en 2018, aseguró haber completado con éxito la limpieza de 185 km de camalote en el río Guadiana. Actualmente se están realizando trabajos de vigilancia y alerta temprana necesarios para poder asegurar que la erradicación de esta especie invasora será posible de forma definitiva en los próximos años (CHDG, 2020).

Debido a su rápido crecimiento y propagación, y a la dificultad de conseguir un método de control único y generalmente aceptable, esta planta puede bloquear la llegada de la luz solar y el nivel de oxígeno a los sistemas acuáticos, perjudicando la calidad del agua y afectando gravemente el empleo de los recursos hídricos, la ecología, la conservación de la biodiversidad o, incluso, el bienestar de las poblaciones riverleñas (Zimmels et al., 2006). Por ello actualmente se están tratando de explorar potenciales de

esta planta invasora (Amalina et al., 2022), principalmente, como fuente de biomasa debido a su elevada velocidad de crecimiento, potencial fuente de fitoquímicos (amoníaco, nitrato, nitrito y fosfato), porosidad del tallo, etc.

Entre las aplicaciones principales de esta planta destacan: la fabricación de papel (Islam et al., 2021), la alimentación animal (Indulekha et al., 2019), la producción de etanol (Singh y Bishnoi, 2013), la generación de biogás (Zimmels et al., 2006), la producción de compost (Islam et al., 2021), el tratamiento de efluentes (Amalina et al., 2022; Lin et al., 2020), la producción de fertilizante orgánico (Talkah, 2015), la obtención de materiales carbonosos como carbón activado (Li et al., 2021), hidrocarbonizado (Román et al., 2020) o biocarbonizado (Yin et al., 2022), las aplicaciones biomédicas (Taqi et al., 2019), la fabricación de muebles y el sector energético (Rezania et al., 2015). Además, otro estudio sugiere que esta planta, sola o combinada con otros materiales constructivos, podría ser empleada como aislante en la construcción (Philip y Rakendu, 2020). En el caso del sector de la construcción, se ha propuesto el uso del tallo de camalote, solo o combinado con diferentes materiales constructivos (cemento, resina), principalmente con miras a su aplicación como aislante térmico (Bhuvaneshwari y Sangeetha, 2017; David et al., 2022; Hankhantod et al., 2022; Jaktorn y Jiajitsawat, 2014; Nguyen et al., 2021; Philip y Rakendu, 2020; Salas-Ruiz et al., 2019; Salas-Ruiz y Barbero-Barrera, 2019; Sharma et al., 2021; Sruti et al., 2021) o mezclado con otros materiales poliméricos para su uso como absorbente acústico (Cayanan et al., 2019; El-Wakil et al., 2021; Elvaswer, 2015; Rohman et al., 2022; Setyowati et al., 2018; Sukhawipat et al., 2021, 2022), arcilla (Setyowati et al., 2021) y de forma natural, pero tejido en forma de mantel (Rohman et al., 2022). Todos estos estudios, refuerzan el potencial empleo de esta planta invasora para su uso como material aislante.

En esta tesis doctoral, se han preparado y analizado diversos materiales a partir de este residuo biomásico con miras a su aplicación en el sector de la construcción como material aislante térmico y acústico. Durante la preparación de estos materiales se han contemplado diversas variables: el material aglutinante, el tamaño de partícula, la cantidad de cada fase o el grado de compactación. Además de las propiedades mecánicas y térmicas, se han determinado características físicas y químicas de las muestras con la finalidad de conocer más en detalle su comportamiento en servicio y su posible implementación como material aislante en la construcción, bien solo o combinado con otros materiales constructivos.

En este capítulo se detallan los materiales utilizados y los métodos de preparación de las muestras. Así mismo, se concretan las técnicas empleadas para la caracterización de las muestras, y se muestran y discuten los resultados obtenidos

relativos a la caracterización físico-química del material de partida. Finalmente, con el fin de complementar los resultados empíricos, se ha realizado una simulación del comportamiento térmico de los materiales preparados en los muros de la envolvente de una vivienda unifamiliar, empleando el *software Cypetherm HE Plus*. En la última parte de este capítulo se explica el procedimiento seguido.

3.2. MATERIALES

3.2.1 TALLO DE JACINTO DE AGUA (EICHHORNIA CRASSIPES)

3.2.1.1 Recolección de la materia prima

El jacinto de agua está catalogado como especie invasora en nuestro país (MITECO, 2023) por lo que para su recogida, transporte y manipulación se debe pedir un permiso especial a la CHDG (ver Anexo 2). Una vez concedido este permiso, el personal de dicho organismo facilita el acceso al lugar del río donde se puede recoger la planta que se ha depositado en la orilla fluvial mediante una grúa (ver [Figura 3.1](#)).

La recogida de la planta se realizó a finales del mes de septiembre 2019 y se transportó en unos bidones herméticos de 5 litros desde el río hasta las instalaciones de la Universidad de Extremadura (Centro Universitario de Mérida y Escuela de Ingenierías Industriales de Badajoz) para poder empezar con el proceso de adecuación.



Figura 3.1. Imágenes del proceso de recolección y adecuación de la materia prima.

3.2.1.2 Adecuación y obtención de la materia prima

Para realizar la adecuación de la planta invasora, se necesitaron varias semanas para finalizar las etapas sucesivas de secado, triturado y molienda, y tamizado. Primero, las plantas se secaron al sol durante una semana. Transcurrido este tiempo, se transportaron al laboratorio donde se separó el tallo, que es la parte de la planta con la cual se ha trabajado. La raíz y las hojas de la planta se desecharon y se llevaron de nuevo a los márgenes del río en cubos herméticos para que el personal de la CHDG las quemara para así deshacerse de ellas correctamente.

Seguidamente, los tallos se secaron con una estufa a de 100 °C durante 24 horas para completar su secado. A continuación, los tallos secos se trituran con ayuda de una batidora de vaso profesional de 1200 W de potencia (Jata). Posteriormente, los tallos triturados se introdujeron en una tamizadora vibratoria (Cisa) para obtener partículas de tallo de camalote seco con rangos de tamaño (tp) concretos: menores a 0,5 milímetros (mm) (A), entre 0,5 y 1 mm (B) y entre 1 y 2 mm (C) (ver [Figura 3.2](#)). Tras la obtención de las partículas de tallo de camalote tamizadas, y que se denotan como WHS de aquí en adelante (ver [Figura 3.2](#)), el material se almacenó en bolsas herméticas etiquetadas para su posterior uso y caracterización.

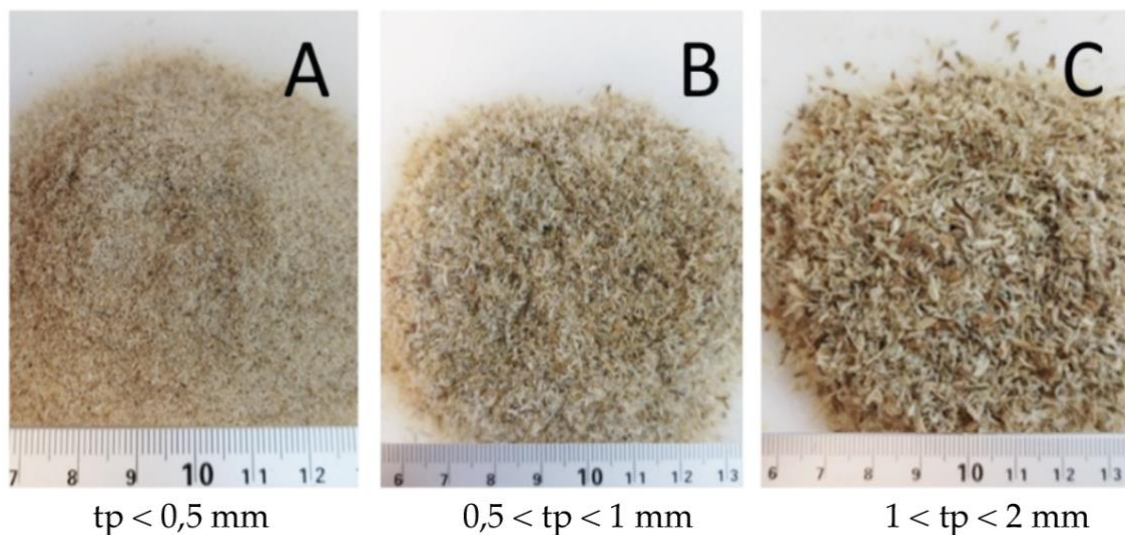


Figura 3.2. Materias primas preparadas con diferentes tamaños de partícula (tp).

3.2.2 OTROS MATERIALES

Para conseguir distintas muestras de material compuesto, además de camalote, se requiere usar algún material de relleno o aglutinante. Específicamente, se emplearon

ligantes (cola blanca y almidón de maíz) para reforzar la unión interparticular de las muestras preparadas solo con WHS, y otros materiales constructivos (yeso, resina, y cemento).

3.2.2.1 Cola blanca de carpintero

La cola común para madera es un material ampliamente disponible para aplicaciones domésticas. Dadas sus propiedades de adherencia, ha sido posible crear materiales de bajo coste (por ejemplo, tableros de partículas) a partir de diferentes biomásas (Merli et al., 2021). En esta investigación se ha propuesto como ligante de las partículas de WHS la cola blanca para madera de secado rápido *SuperTite* que es un pegamento a base de resina de polivinilo.

3.2.2.2 Polvo de almidón de maíz

El almidón de maíz es un polisacárido natural, con un gran número de unidades de glucosa unidas por enlaces glucosídicos y se considera una sustancia aglutinante o ligante muy versátil y rentable para una amplia gama de aplicaciones, como la elaboración de briquetas de biomasa (Chinyere et al., 2014) o el carbón vegetal (Zanella et al., 2016). La aplicación del almidón y sus derivados es cada vez más común en la industria de la construcción (Mansour et al., 2020), donde se ha utilizado ampliamente como material aglutinante para mejorar las propiedades mecánicas, reológicas, de degradación, de aislamiento térmico y otras propiedades físicas de diferentes materiales (Le et al., 2014). En esta investigación se ha utilizado almidón de maíz en polvo (*Sigma-Aldrich*) soluble en agua (CAS Number: 9005-25-8) como ligante de las partículas de WHS.

3.2.2.3 Yeso comercial

Como aglutinante de las partículas de WHS se utilizó el yeso de construcción controlado *Longips* tipo B1 (EN13279-1:2009), denominado en adelante G, de Saint-Gobain Pleco Ibérica. Según el proveedor, la distribución granulométrica de G varía entre 0,1 y 1 mm. En la [Tabla 3.1](#) se muestran las principales características de este material proporcionadas por el proveedor cuando se ha secado completamente después de su aplicación en paredes.

Tabla 3.1. Características del yeso comercial a 23 °C y una humedad relativa del 50%.

Característica	Valor
Densidad	0,6-1,5 g/cm ³
Conductividad térmica	0,18-0,56 W/mK
Factor de resistencia a la difusión del vapor de agua	6
Resistencia a la flexión y a la compresión	>2 N/mm ²

3.2.2.4 Resina epoxi

En este estudio se ha empleado como aglutinante de WHS una resina epoxi (*Fantasy Craft*), especial para para bricolaje, madera, artesanía o joyería. Se trata de un producto bicomponente, compuesto por la resina epoxi y el endurecedor. La proporción de la mezcla de ambos productos ha sido de 100 g de resina por 33 g de endurecedor (3 a 1) y el tiempo de curado mínimo indicado de 12 a 24 horas a 20 °C.

3.2.2.5 Cemento

En este trabajo de investigación se ha utilizado cemento clásico (*LafargeHolcim*) para uso interior y exterior (ver [Tabla 3.2](#)). Según las especificaciones de este producto comercial, el cemento está compuesto de clínker y adiciones en distintas proporciones en masa. El *clínker* de cemento Portland (Nº EINECS 266- 043-4 Nº C.A.S. 65997-15-1) está compuesto principalmente de silicato, aluminato y ferritoaluminato de calcio, pequeñas cantidades de cal libre, óxido de magnesio, sulfato de sodio, potasio y calcio, así como trazas de metales. Las adiciones pueden ser: cenizas volantes (Nº C.A.S. 68131-74-8), caliza, escoria (Nº C.A.S. 65996-69-2), puzolana o humo de sílice.

Tabla 3.2. Características del cemento a 20 °C.

Características	Valor
Granulometría	5 – 65 µm
Solubilidad en agua	0,1-1,5 g/l
Densidad absoluta	2,75-3,20 g/cm ³
Densidad aparente	0,9-1,5 g/cm ³
pH en solución acuosa	11-13,5
Temperatura de fusión	> 1.250 °C

3.3. PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES

3.3.1 DISEÑO Y DESARROLLO DE LOS MOLDES

Para el diseño de los moldes se ha utilizado el *software Solidworks* (versión 2020). El desarrollo y materialización de los moldes y los pistones utilizados para compactar en ellos se ha conseguido mediante el empleo de una serie de herramientas comunes de taller (taladro, brocas y sierras de corona) y una impresora 3D de filamento (*Creality Ender 3-Pro*). El filamento empleado para la fabricación de los moldes ha sido ácido poliláctico (PLA), un termoplástico producido con recursos renovables como el almidón de maíz, las raíces de tapioca o la caña de azúcar.

Las muestras se han preparado mediante el proceso de moldeo y compactación. Por un lado, se ha realizado la compactación de forma manual. Para ello, inicialmente se emplearon moldes de aleación de aluminio de 60 mm de diámetro (moldes para hostelería, ver [Figura 3.3](#)). Como pistón compactador se empleó un cilindro de espuma polimérica de 58 mm de diámetro con el hueco central tapado mediante una lámina de plástico lisa acoplada. Las dimensiones de las muestras obtenidas se indican en el apartado 3.3.2.



Figura 3.3. Molde de aluminio de 60 mm de diámetro utilizado en la preparación de las muestras y del pistón empleado para ejercer presión.

Una vez fueron caracterizadas física y térmicamente, las muestras se adaptaron para el análisis acústico, que requería diámetros inferiores a 30 mm. Para ello, las muestras se cortaron y lijaron de forma manual. Para el corte se utilizó un cúter, brocas, un taladro y lijas de diferente gramaje. En concreto, se eligió una broca en forma de corona de diamante de 35 mm de diámetro (ver [Figura 3.4](#)) que permitió, mediante su

colocación en el taladro percutor, un corte limpio de las muestras para su posterior lijado y pulido.

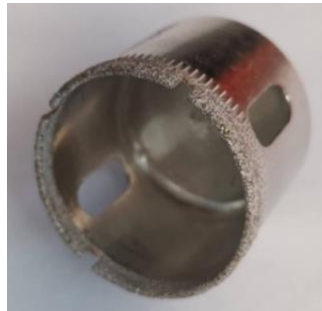


Figura 3.4. Sierra de corona con diamante utilizada para el corte de las muestras.

Por otro lado, otras muestras se prepararon mediante moldeo y compactación controlada con ayuda de una prensa hidráulica modelo FTX12001 de BIB RED JACKS (se aportan más detalles en el apartado 3.3.2). Para llevar a cabo la compactación controlada se empleó un tubo rígido de policloruro de vinilo (PVC) como molde (ver Figura 3.5, izquierda) actuando como compactador el propio pistón de la prensa. Tras una serie de pruebas fallidas, el molde plástico se sustituyó por otro de acero inoxidable que es un cilíndrico hueco sin uniones y con un diámetro de 60 mm (ver [Figura 3.5, derecha](#)).



Figura 3.5. Moldes de PVC (izquierda) y acero inoxidable (derecha) empleados para la preparación de las muestras.

Como elemento compactador para este molde se probaron varias alternativas: el propio pistón de la prensa, un disco de plástico rígido y un tablero de fibras de densidad media (MDF, *Medium Density Fiberboard*) en forma de 5 mm de espesor y 58 mm de diámetro (ver [Figura 3.6](#)). Estos discos de madera se prepararon con ayuda de un taladro percutor. Teniendo en cuenta los buenos resultados obtenidos con el conjunto molde de acero y disco de MDF, se prepararon todas las muestras destinadas a su caracterización térmica bajo una compactación de 1 y 2 t.



Figura 3.6. Disco de MDF empleado como compactador del molde de acero inoxidable para la preparación de las muestras a 1 y 2 t.

También se tuvo que preparar una superficie de trabajo o base para poder apoyar cómodamente la cara inferior de la muestra en el molde. Inicialmente se probó con tacos de madera de distintos espesores pintados previamente para protegerlos de la humedad. Sin embargo, estos no soportaban los esfuerzos aplicados por la prensa hidráulica y se fracturaban, por lo que tenían que ser reemplazados frecuentemente. Finalmente se decidió colocar chapas metálicas de 40 x 145 x 2 mm en la parte superior del taco de madera, pegando las chapas al taco con un pegamento especial (ver [Figura 3.7](#)).



Figura 3.7. Base de madera cubierta con chapas metálicas para la preparación de las muestras en prensa hidráulica.

Una vez caracterizadas térmicamente las muestras preparadas bajo carga controlada, se procedió a su corte y lijado para adaptarlas a las dimensiones requeridas para su caracterización acústica. Siguiendo la experiencia de las muestras preparadas mediante compactación manual, se empleó el mismo procedimiento, cortando con una sierra de corona con diamante ([Figura 3.4](#)). Sin embargo, estas muestras compactadas presentaron mucha mayor resistencia resultando inviable su corte. Se probó otra sierra de corona, esta vez dentada (ver [Figura 3.8](#)), con la que fue posible cortar las muestras compactadas a 1 t, pero no aquellas compactadas a 2 t.



Figura 3.8. Broca de corona con dientes para el corte de las muestras empleando un taladro.

Para solventar este problema, se decidió preparar las muestras directamente con el diámetro requerido para las pruebas acústicas (diámetro de 39 mm). Para ello se diseñó un molde con pistón compactador y se materializó en PLA mediante la impresora de fabricación aditiva 3D de filamento (*Creality Ender 3-Pro*). El primer prototipo de molde diseñado presentó una base bastante amplia para anclarlo a la base de apoyo durante el proceso de moldeo evitando que se pudiera deslizar de su posición (ver [Figura 3.9](#)). El molde tiene un diámetro interior de 30 mm y una altura de 60 mm, de tal forma que se garantiza el espacio suficiente para que entre toda la cantidad de material sin compactar. También tiene dos lados de la base más largos que facilitan su agarre durante el desmoldeo de la muestra. En el Anexo 3 se presenta el plano del molde con las cotas. Sin embargo, se realizó un ensayo inicial empleando un pistón obtenido también mediante fabricación aditiva y éste quedaba aplastado al aplicar una mínima fuerza, y el molde también presentaba grietas cuando se realizaba la compactación.



Figura 3.9. Molde de PLA impreso en 3D para la obtención de las muestras de 29 mm.

Como consecuencia, se planteó el rediseño de la pieza, aumentando el espesor de la pared y utilizando un pistón de madera tratado con resina. Sin embargo, el pistón de madera no soportó los esfuerzos durante la compactación y se fracturó. Se optó entonces por un pistón de acero hecho a medida para este molde (28 mm). Con este método se consiguió preparar las muestras compactadas a 1 t, sin embargo, no fue posible para las de 2 t. Por ello, se sustituyó el molde de PLA por otro de acero de 30 mm (ver [Figura 3.10](#)).

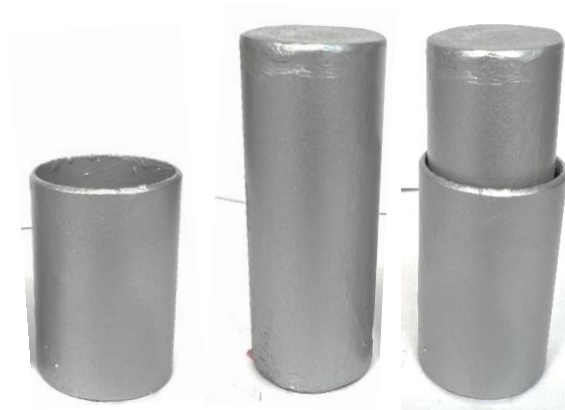


Figura 3.10. Molde (izquierda), pistón (centro) y conjunto molde/pistón utilizados para la preparación de las muestras de 29 mm con carga controlada.

Para preparar muestras con distinto espesor mediante compactación manual, se diseñó y desarrolló un molde con PLA mediante fabricación aditiva (ver [Figura 3.11](#)). En este caso, los resultados fueron bastante satisfactorios ya que tanto el molde como el pistón fueron resistentes bajo carga manual. Los planos del molde con el pistón se pueden encontrar en el Anexo 3.



Figura 3.11. Molde impreso en PLA para la preparación de muestras por compactación manual.

Finalmente, para la caracterización mecánica de las muestras mediante ensayos de flexión, se necesitó adquirir moldes rectangulares que facilitaran una conformación rectangular de las muestras. Inicialmente se emplearon moldes de aluminio cuadrados de 80 x 80 mm y un cabezal de madera para ejercer la presión de compactación. Pero por motivos de practicidad, se sustituyeron posteriormente por otros de plástico de mayor tamaño (145 x 145 mm) diseñados por la doctoranda y fabricados en Poliamida 12 (PA12) por una empresa externa (*Addwerk*) mediante la técnica de modelado por deposición fundida (FFF). Los moldes fueron recubiertos con un esmalte gris para coches con la finalidad de facilitar el desmolde de la muestra. En el Anexo 3 se muestran las vistas y cotas del molde.

3.3.2 PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS

3.3.1.1 Preparación de muestras sólo a base de WHS

Se prepararon varias series de muestras mediante compactación de las partículas de WHS mezcladas con agua corriente (~1 g de agua por g de WHS) con y sin ligantes. Los ligantes empleados fueron cola blanca de carpintero y almidón de maíz en polvo, ambos solubles en agua. En ambos casos, la proporción en peso de ligante y agua fue de 0,2:1. Las mezclas bien homogeneizadas (WHS:agua o WHS:agua:ligante) fueron introducidas en un molde cilíndrico colocado sobre una superficie lisa de madera. Mediante un pistón adecuado, se presionó la mezcla en dirección perpendicular a la superficie de apoyo de la muestra. Durante el prensado de la mezcla en el molde se emplearon diferentes grados de compactación, bien de forma manual, o mediante una prensa hidráulica de taller modelo FTX12001 (BIB RED JACKS) a 1 t y 2 t durante 24 h. Esta prensa presentaba 12 t de capacidad y el prensado se realizaba mediante un cilindro hidráulico con bomba manual y manómetro. Una vez desmoldada la muestra se dejaba secar a temperatura ambiente durante siete días. Tras el secado, se eliminaban las imperfecciones superficiales y se alisaban todo lo posible ambas caras de la muestra usando una lija suave. Posteriormente las muestras se pesaban, se anotaban sus dimensiones y se almacenaban en bolsas herméticas para su posterior caracterización. Las muestras cilíndricas preparadas inicialmente presentaron un diámetro medio de $58,7 \pm 0,5$ mm y un espesor que varía desde 10,4 a 18,1 mm. La nomenclatura general utilizada para estas muestras ha sido WHS-X-100-M-Y, siendo X el tamaño de partícula (tp) de WHS utilizado (A: $tp < 0,5$ mm; B: $0,5 < tp < 1$ mm; o C: $1 < tp < 2$ mm), M el material ligante empleado (sin etiqueta: no lleva ligante, ALMIDÓN: almidón de maíz, COLA: cola blanca), Y la carga aplicada durante la compactación de la muestra (sin etiqueta: compactación manual, 1T: compactación controlada a 1 t, o 2T:

compactación controlada a 2 t) y Z el espesor de la muestra. Con fines ilustrativos, en la [Figura 3.12](#) se muestran las muestras: WHS-B-100, WHS-B-100-1T y WHS-B-100-2T, preparadas con partículas de WHS de entre 0,5 y 1 mm, sin ligante y a diferentes grados de compactación.

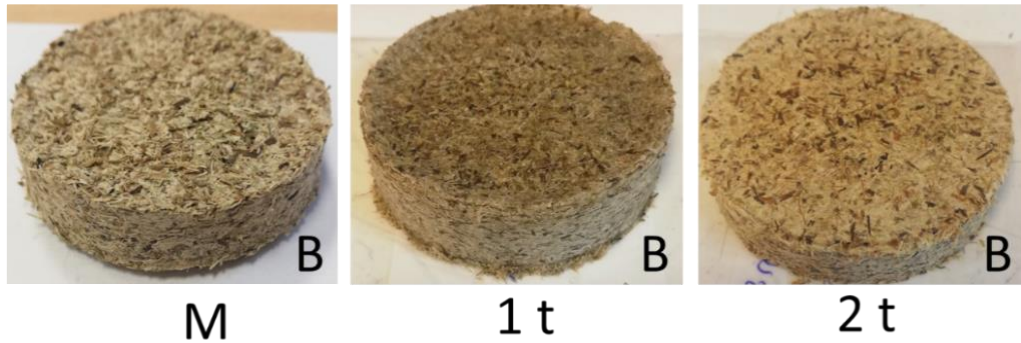


Figura 3.12. Muestras preparadas con partículas de WHS de entre 0,5 y 1 mm, sin ligante y a diferentes grados de compactación.

3.3.1.2 Preparación de materiales compuestos a base de WHS y yeso

Se prepararon muestras de control compuestas íntegramente por yeso, en las que se mezcló yeso con agua, concretamente se añadió ~1 g de agua por g de yeso.

En el caso de los materiales compuestos con WHS y yeso, se prepararon muestras con distintas proporciones WHS:G para cada tamaño de partícula. Se mezclaron inicialmente las partículas de WHS con el yeso en la proporción deseada (1:0, 1:1, 3:7, 1:4, 1:9, 1:19, 1:99), y posteriormente se añadió el agua. Al igual que en el caso anterior, se incorporó 1 g de agua por g de la mezcla WHS:G. A modo de ejemplo, en la [Figura 3.13](#) se aportan dos fotografías de la muestra WHS-B-50-1 preparada con partículas de WHS de entre 0,5 y 1 mm, con una proporción de WHS:yeso de 1:1 y prensada a 1 t.

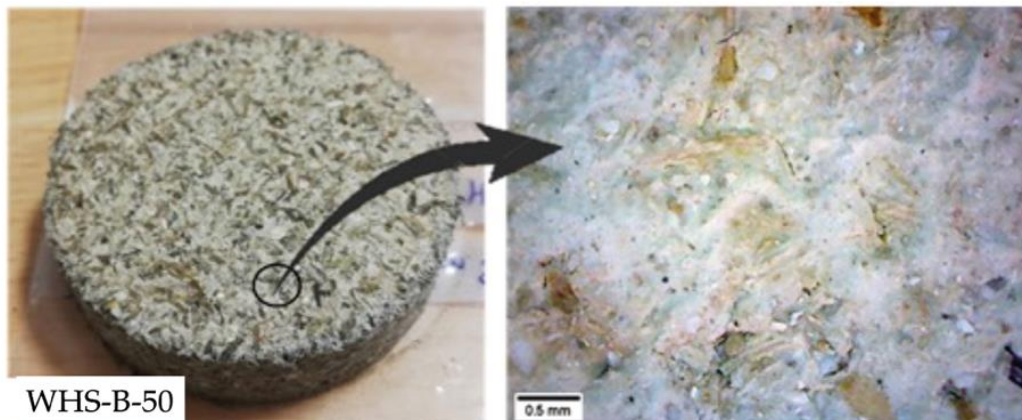


Figura 3.13. Muestra preparada a base de WHS y yeso (1:1).

Una vez realizada la mezcla de las materias primas, pasamos al proceso de dar forma a las muestras a través del método de moldeo mediante presión (manual y controlada). En primer lugar, las muestras control preparadas íntegramente con yeso fueron alisadas superficialmente y se dejaron fraguar.

Para la preparación del biomaterial se mezclan diferentes cantidades de yeso comercial, WHS y agua corriente. La mezcla de los componentes se realizó en un vaso de precipitado con ayuda de una espátula con la finalidad de facilitar la mezcla homogénea de los tres componentes (yeso, WHS y agua). La mezcla obtenida fue depositada en moldes cilíndricos de 60 mm de diámetro y fue prensada de forma manual con ayuda de un émbolo de plástico rígido durante varios segundos. Las muestras se dejaron fraguar durante 2 horas hasta estar lo suficientemente secas y poderse desmoldar con facilidad. Seguidamente, las muestras se secaron en estufa a 100 °C durante 4 horas para asegurar una pérdida total de humedad y, finalmente, se almacenaron en bolsitas herméticas para su posterior análisis.

3.3.1.3 Preparación de muestras a base de WHS y cemento

Para la obtención de las muestras con cemento como aglutinante, se empleó el mismo proceso que en el caso del yeso. Inicialmente se mezclaron las partículas de WHS y el cemento y luego se añadió el agua. Se mezcló todo en un vaso de precipitado hasta conseguir una pasta homogénea. Se fabricaron dos proporciones refuerzo/matriz de este compuesto: 1:1, donde se mezclaron 17 g de WHS, 17 g de cemento y 15,5 cm³ de agua; y 1:9, donde se mezclaron 3,5 g de WHS, 31,5 g de cemento y 10 cm³ de agua. Los siguientes pasos fueron comunes al método empleado para la preparación de los materiales compuestos basados en yeso.

3.3.1.4 Preparación de muestras a base de WHS y resina epoxi

En el caso de las muestras embebidas en resina epoxi, primero se mezclaron 30 ml de resina con 15 ml de catalizador. Posteriormente, a esta mezcla se le añadieron 5 g de partículas de WHS. Para ello, primero se depositaron 10 ml de la mezcla resina/catalizador en la parte inferior del molde, después se añadieron las partículas de WHS y, finalmente, se añadieron los restantes 35 ml de resina/catalizador. La combinación se dejó fraguar dentro del molde durante 48 horas a temperatura ambiente y posteriormente se desmoldó. Considerando la densidad de la resina igual a 1,1 g/cm³, se puede aproximar que la proporción refuerzo/matriz empleada durante este proceso fue de 1:10.

3.4. TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN

3.4.1 ANÁLISIS DE LA MATERIA PRIMA

3.4.1.1 Análisis elemental

El análisis elemental de las muestras se llevó a cabo en un analizador elemental (*Eurovector EA 3000*), de acuerdo con la norma CEN/TS 15104 para determinar el contenido de carbono (C), hidrógeno (H) y nitrógeno (N) (CEN/TS 335 *Biomass standards*, 2004) dando el resultado en porcentaje en masa de cada uno de ellos en base seca. Antes de ser introducidos en el mismo, las muestras estaban perfectamente secas con el objetivo de eliminar el hidrógeno y el oxígeno procedente de su humedad. El porcentaje de C, H y N y azufre (S) es una media de los valores obtenidos en los ensayos realizados. El analizador elemental calculó automáticamente estos datos. El porcentaje de oxígeno (O) de la muestra se calcula por diferencia según la ecuación 3.1:

$$O = 100 - (C + H + N + S) \quad [3.1]$$

3.4.1.2 Análisis termogravimétrico

El perfil de degradación térmica del material de partida se determinó a través de los servicios de apoyo a la investigación de la Universidad de Extremadura (SAIUEx) empleando una termobalanza modelo Q5000 IR (*TA Instruments*). Este equipo permitió registrar con gran precisión la pérdida de masa de la muestra objeto de estudio en función de la temperatura y el tiempo. El ensayo consistió en colocar la muestra en un crisol cerámico, capaz de soportar altas temperaturas, y se estableció una secuencia de calentamiento a la vez que se seleccionaban los gases portadores requeridos, en este caso aire y argón. Las condiciones empleadas fueron para cada caso, una rampa de calentamiento de 10 °C/min y un caudal de gas de 100 mL/min. A partir de las curvas obtenidas con este análisis térmico se determinó el análisis aproximado del material.

3.4.1.3 Determinación de la densidad real

El análisis de densidad real (o verdadera) de las partículas de WHS y del yeso se realizó mediante la técnica de picnometría de helio, empleando un estereopicnómetro modelo SPY-D160-E (*Quantachrome*) en el servicio de apoyo a la investigación (SAIUEx).

Mediante esta técnica se puede determinar la densidad verdadera de una muestra sólida o semisólida (polvo fino, grano, pellets, sólidos monolíticos o fragmentos, fibras, etc.). El funcionamiento del picnómetro de Helio (He) se basa en la Ley de Boyle-Mariotte aplicada al comportamiento de los gases ideales. Se emplea el He porque es el gas inerte de menor tamaño, lo cual le permite penetrar en los poros más finos, de hasta 20 nm de diámetro. Esto permite determinar el volumen real de la muestra de manera rápida y precisa.

3.4.2 ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO DE LAS MUESTRAS

3.4.2.1 Determinación de la densidad aparente

La densidad aparente es la relación entre el volumen y la masa seca de un cuerpo, pero al contrario que la densidad verdadera, ésta contempla los huecos y poros que contiene el material. En este caso, la densidad aparente del compuesto ha sido determinada a temperatura ambiente, mediante la ecuación 3.2:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad [3.2]$$

donde m es la masa del material compuesto en g, obtenida con una balanza eléctrica de precisión 0.01 g; V es el volumen del material en cm^3 obtenido mediante la ecuación 3.3:

$$V = \pi h r^2 \quad [3.3]$$

donde h es el espesor de la muestra en cm; y r es la mitad del diámetro de la muestra en cm. Ambas medidas fueron tomadas con un calibre de precisión 0,05 mm. Tanto en la balanza como en el calibre, se tomaron al menos 5 medidas y se calcularon las medias y las desviaciones para obtener los valores más exactos.

3.4.2.2 Determinación de la porosidad de las muestras

La porosidad representa la cantidad de poros que tiene un material. En esta investigación la porosidad total de las muestras (%TP) se estimó empleando la densidad real del camalote y el yeso, y la densidad aparente de los materiales preparados, a través de la ecuación 3.4, basada en las relaciones de peso y volumen de materiales compuestos:

$$\%TP = V_p \times 100 \quad [3.4]$$

donde V_p es la fracción de volumen de la fase de poro del material, obtenida mediante las ecuaciones 3.5 y 3.6, que han sido deducidas en base a otros estudios (Ajith y

Gopalakrishnan, 2013; Ashby, 2011; Berger, 2010; Madsen et al., 2007, 2009; Tam et al., 2012):

$$V_f + V_m + V_p = 1 \rightarrow V_p = 1 - (V_f + V_m) \quad [3.5]$$

$$V_p = 1 - \left(\frac{v_f}{v_c} + \frac{v_m}{v_c} \right) \rightarrow V_p = 1 - \left(\frac{W_f w_c}{\rho_f v_c} + \frac{(1 - W_f) w_c}{\rho_m v_c} \right) \quad [3.6]$$

donde v_f es el volumen absoluto del refuerzo en cm^3 , v_m es el volumen absoluto de la matriz en cm^3 , v_c es el volumen absoluto del material compuesto en cm^3 , W_f es la fracción de masa de la fibra de camalote, w_c es el peso absoluto en g de la muestra del material compuesto, ρ_f es la densidad de la fibra en g/cm^3 , y ρ_m es la densidad de la matriz en g/cm^3 .

El %TP se puede expresar también como la suma de la porosidad aparente (%AP), que es el porcentaje del volumen de poros abiertos con respecto al volumen total, y la porosidad cerrada (%CP), que es el porcentaje del volumen de poros cerrados con respecto al volumen total (Ec. 3.7):

$$\%TP = \%AP + \%CP \quad [3.7]$$

La %AP y la %CP de cada muestra se obtuvieron mediante un método de intrusión de agua conocido como método de Arquímedes según la norma UNE-EN ISO 18754:2022 (UNE-EN-ISO, 2022). Este experimento se realizó cinco veces para tener un valor promedio. %AP se estimó así:

$$\%AP = \left(\frac{SKW - DW}{SKW - SPW} \right) \times 100 \quad [3.8]$$

donde DW es la masa de la muestra seca, SKW es la masa de la muestra empapada en agua y SPW es el peso aparente de la muestra sumergida. El %CP se obtuvo restando %AP de % TP veces para tener un valor medio.

3.4.2.3 Análisis adsorción de N_2

La microporosidad de las muestras se ha estudiado mediante adsorción de N_2 a -196°C , utilizando una unidad de adsorción de gases semiautomática (*AUTOSORB-1*, *Quantachrome*). Antes de los análisis, las muestras fueron siempre sometidas a una desgasificación a 120°C durante 12 h.

Los datos experimentales de adsorción fueron analizados mediante procedimientos habituales de caracterización de sólidos porosos. En particular, se emplearon los siguientes modelos para calcular: (a) el valor de la superficie específica BET (S_{BET}); (b) la superficie externa (S_{EXT}), determinada por el método α_s , usando el sólido referencia no poroso propuesto por Carrott y col. (1987) (c) el porcentaje de superficie interna (S_{INT}), calculada como la diferencia entre S_{BET} y S_{EXT} ; (d) el volumen de microporos a partir de la ecuación de Dubinin–Radushkevich (V_{miDR}); y (e) el volumen de mesoporos (V_{me}), calculado como la diferencia entre el volumen de adsorción a las presiones $p/p^0 = 0,95$ y $p/p^0 = 0,10$.

3.4.2.4 Determinación de la conductividad térmica

Para caracterizar el comportamiento térmico de los materiales, se han determinado la conductividad térmica, $\lambda \left(\frac{W}{m K} \right)$ y la efusividad térmica, $e (Ws^{0.5}/m^2K)$. Estas propiedades pueden ser medidas mediante dos métodos diferentes: de estado estacionario y transitorio. Los métodos de estado estacionario aplican una fuente de calor continuamente, mientras que los transitorios aplican la fuente de calor periódicamente o en un pulso (Daza-Mafioli et al., 2019). Se optó por usar el método transitorio porque no requiere muestras de gran tamaño.

Entre las diferentes metodologías disponibles para la medida en la opción transitoria, en esta investigación se ha empleado el método de fuente de plano transitorio modificado, basado en la norma ASTM D7984 (ASTM D7984-16, 2021). Este es un método no destructivo, cuya prueba tan solo tarda unos segundos y que requiere un tamaño de muestra reducido. En concreto, las muestras fueron analizadas en los Servicios Técnicos de Investigación pertenecientes a la Unidad de Análisis Térmico y Caracterización Textural de Sólidos de la Universidad de Alicante. El instrumental empleado para la medición de la conductividad térmica fue un analizador *C-Therm TCi* con sensor universal de la empresa *Mathis Instrumentos Ltd*. El método de medida consiste en un pulso con las siguientes características: tiempo de prueba = 1 s, tiempo de comienzo del cálculo = 0,5 s, tiempo de enfriamiento = 60 s, frecuencia = 100 Hz, nivel de potencia = 37 mA. Para realizar la medición de las muestras se empleó una grasa térmica conductora (*Wakefield 120*). Además, dado que la superficie del material no era completamente regular, para asegurar el mejor contacto posible se empleó una pesa de 500 g situada encima de la muestra. Como patrón de referencia para comprobar que el equipo estaba midiendo correctamente se empleó una pieza de *Pyrex* con el mismo agente de contacto (*Wakefield 120*) y la misma pesa de 500 g. Concretamente, se realizaron 10 medidas de la conductividad por cada muestra a una temperatura ambiente media

de 20,5 °C. La desviación media en la conductividad térmica de las muestras medidas ha sido de 0,002.

3.4.2.5 Determinación de la absorción del sonido

La absorción acústica de los materiales se ha determinado mediante un tubo de impedancia horizontal (tipo 4206, *Hottinger Brüel & Kjaer Ibérica*) en los laboratorios de la Escuela Politécnica de Cáceres de la Universidad de Extremadura. Este tubo estaba equipado con dos micrófonos de condensador de un cuarto de pulgada (Tipo 4187, *Hottinger Brüel & Kjaer Ibérica*) y siguiendo la norma UNE-EN ISO 10534-2 (ISO, 1998). Las señales se analizaron con un sistema portátil *Pulse* de *Brüel & Kjaer* con cuatro canales de datos de entrada (tipo 3560-C, *Nærum*, Dinamarca). Se utilizó un portamuestras con diámetro de 29 mm (válidos en el rango de frecuencias de 500 Hz a 6400 Hz). La desviación media calculada para el NRC fue de 0,048 y la máxima desviación para alfa fue de 0,1.

3.4.2.6 Determinación de la resistencia mecánica

Para la caracterización mecánica de los materiales preparados se han llevado a cabo ensayos de flexión en 3 puntos en una máquina universal de ensayos *Shimadzu AG-IS* equipada con una cédula de carga de 5 kN. Los ensayos se realizaron con una velocidad de travesía constante de 6 mm/min y una distancia entre apoyos de 20 mm. Para el cálculo de la resistencia a flexión o módulo de ruptura (MOR) y el módulo de elasticidad a flexión (MOE), a partir de los valores obtenidos experimentalmente, se han considerado las siguientes ecuaciones (Ecs. 3.9 y 3.10):

$$MOR = \frac{3FL}{2wh^2} \quad [3.9]$$

$$MOE = \frac{L^3}{4wt^3} \frac{\Delta P}{\Delta x} \quad [3.10]$$

donde F es la carga de fractura, L es la distancia entre los dos puntos de apoyo, w es el ancho de la probeta, t es el espesor de la probeta, h es la altura de la probeta y $\Delta P/\Delta x$ es la pendiente de la curva carga-desplazamiento.

Para analizar las propiedades mecánicas, se prepararon 5 probetas rectangulares con unas dimensiones de 60 x 45 x 5 mm (ver [Figura 3.14](#)) de cada muestra mediante una cortadora y lijadora, siguiendo la norma UNE-EN 12089:2013 (UNE-EN, 2013). También con fines comparativos, se preparó una muestra control de yeso. Teniendo en cuenta las

medidas realizadas a cada muestra, se obtuvo una desviación de 0,46 para el MOR y de 9546,66 para el MOE.

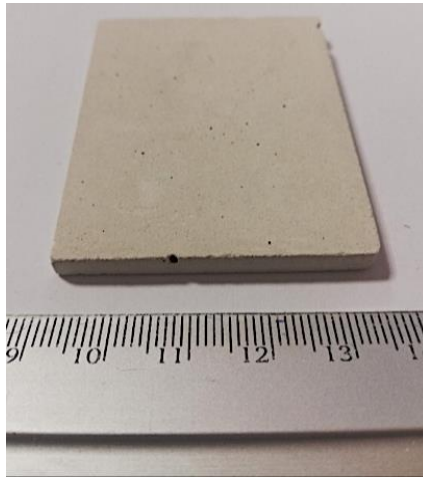


Figura 3.14. Ejemplo de probeta rectangular obtenida para las pruebas de flexión.

3.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.5.1 ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO DE LA MATERIA PRIMA

3.5.1.1 Análisis elemental e inmediato

La [Tabla 3.3](#). muestra el análisis elemental e inmediato de las partículas secas de WHS con un tamaño de partícula de 0,5 a 1 mm y se comparan con los publicados por otros autores. Se observa bastante coincidencia en los valores. El WHS presenta alto contenido en volátiles con un significativo porcentaje de cenizas.

Tabla 3.3. Análisis elemental e inmediato de WHS-B (% en peso).

Análisis elemental				Análisis inmediato (% en peso)				Referencias
C	H	N	O	Cenizas	Compuestos volátiles	Carbono fijo	Humedad	
42,98	5,28	1,79	50,85	1,07	9,6	0,44	88,9	Presente estudio
52,20	16,78	-	-	12,14	-		9,46	Methacanon et al. (2010)
36,44 ±0,12	5,02 ±0,04	3,86 ±0,4	54,68 ±0,03	4,82 ±0,12	79,07 ± 0,61	7,07 ± 0,18	9,04 ± 0,14	Muigai et al. (2021)
39,69	4,2	2,7	28,91	21,1	64,4	14,5	4,9	Sukarni et al. (2020)

3.4.1.2 Análisis termogravimétrico

A nivel de composición química la biomasa está fundamentalmente compuesta por moléculas de tres grupos: hemicelulosa, celulosa y lignina, que afectan a su comportamiento térmico y a sus propiedades fisicoquímicas (Hernández-Beltrán et al., 2019). En la [Figura 3.15](#) se ilustra un esquema de dichas macromoléculas. En general, la proporción en que estas moléculas se hayan en la biomasa determina el modo en que tendrá lugar su degradación térmica. La celulosa forma microfibrillas que funcionan como el esqueleto de la pared celular, dando consistencia a la planta. En su interior, la hemicelulosa y la lignina se conectan con la primera a través de enlaces de hidrógeno, mientras que las conexiones entre hemicelulosa y lignina incluyen enlaces covalentes (Wang et al., 2017).

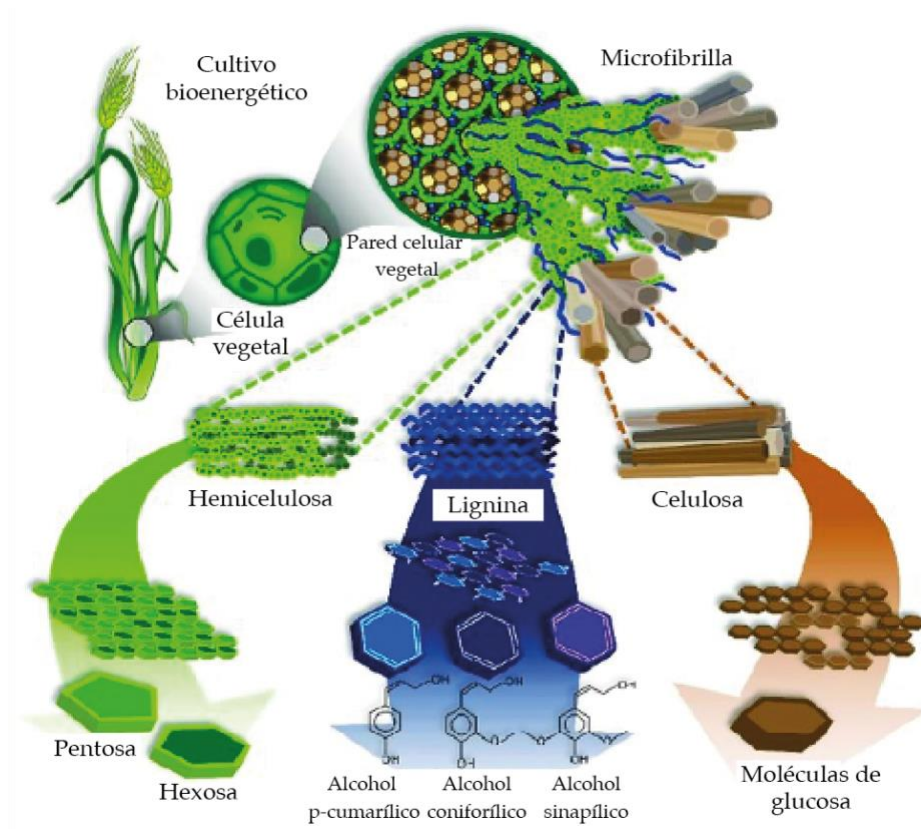


Figura 3.15. Estructura de un material lignocelulósico. Tomada y adaptada de Wang y col. (2017)

En la [Figura 3.16](#) se muestra la curva obtenida a través del análisis termogravimétrico (TGA) obtenida para el WHS. Se observa que a temperaturas por debajo de 150 °C se produce una ligera pérdida de masa debida principalmente a la liberación de humedad por el secado del material que se produce a esa temperatura. En

el rango entre 200 y 600 °C se produce una importante pérdida de masa, posiblemente debido a la liberación de CO₂ y CH₄ tras la descomposición de hemicelulosas (190–320 °C), la celulosa (280–400 °C) y la lignina (320–450 °C). Posteriormente, la pérdida de masa que ocurre a temperaturas entre los 450 y 600 °C podría relacionarse con la liberación de CO₂ agregado químicamente y agua anclada químicamente (Chornet y Overend, 1985). Finalmente, entre 600 °C y aproximadamente 900 °C, la velocidad de pérdida de masa se desacelera, hecho que puede estar relacionado con la degradación de especies más resistentes, que contienen carbono (CO_x, C_xH_y y alquitrans) y la oxidación del carbón hasta que se alcanza un peso constante (Chornet y Overend, 1985).

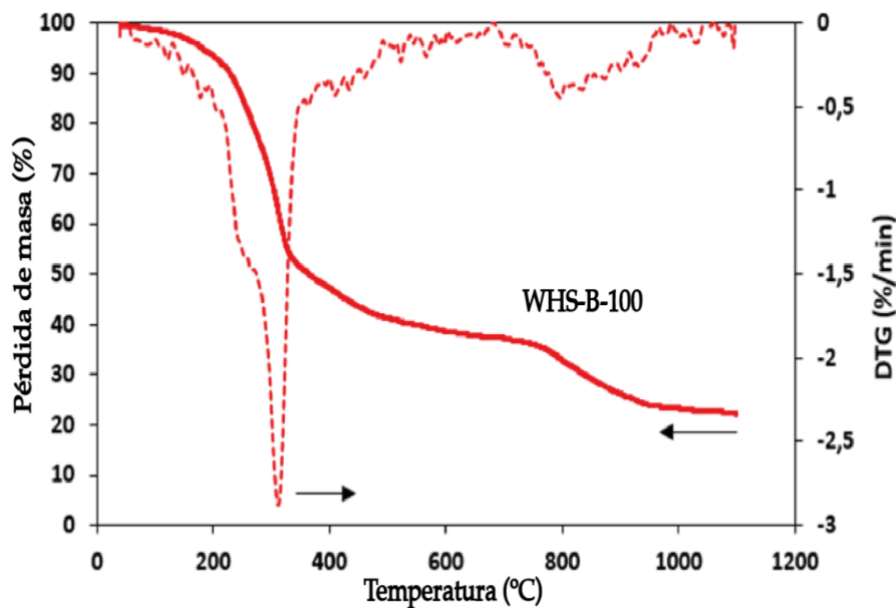


Figura 3.16. Curvas TG y DTG de la muestra WHS-B bajo atmósfera N₂.

3.4.1.3 Determinación de la densidad real de las partículas de WHS

En la [Tabla 3.4](#) se presentan los valores de densidad real obtenidos para los diferentes tamaños de partículas de WHS secas. En general, se obtuvieron valores entre 1,193 g/cm³ y 1,733 g/cm³. Se puede decir que el material con menor tamaño de partícula presenta una densidad real ligeramente superior que el material de mayor tamaño de partícula. Este resultado podría explicarse acudiendo a la mayor cantidad relativa de pulpa (parte más porosa) que de corteza, para las partículas más grandes. Ello es consistente con el hecho de que las partículas de WHS con tamaño entre 0,5 mm y 1 mm (WHS-B) mostraron el valor más alto de densidad real. Salas y col. (2019) observaron una tendencia opuesta en sus investigaciones, aunque hay que resaltar que en su caso el rango de tamaños de partícula estudiados fue superior a 2 mm en todos los casos.

Tabla 3.4. Densidad real de los diferentes rangos de tamaño de partícula de WHS.

Nombre de WHS	Tamaño de partícula (mm)	Densidad real (g/cm ³)
A	< 0.5	1.411
B	0.5 - 1	1.733
C	1 - 2	1.193

3.5.2 ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS

3.5.2.1 Densidad aparente de las muestras

Los valores de la densidad aparente obtenidas para las muestras preparadas en su totalidad con WHS junto a la muestra preparada solo con yeso (G) se representan en la [Figura 3.17](#). Como era de esperar, los valores de la densidad aparente de los materiales biomásicos fueron menores que los obtenidos para la muestra de control G, preparada con un 100% de yeso. Además, la muestra preparada con el tamaño de partícula intermedio (WHS-B-100) presentó la menor densidad, siendo WHS-A-100 y WHS-C-100 igual de densas.

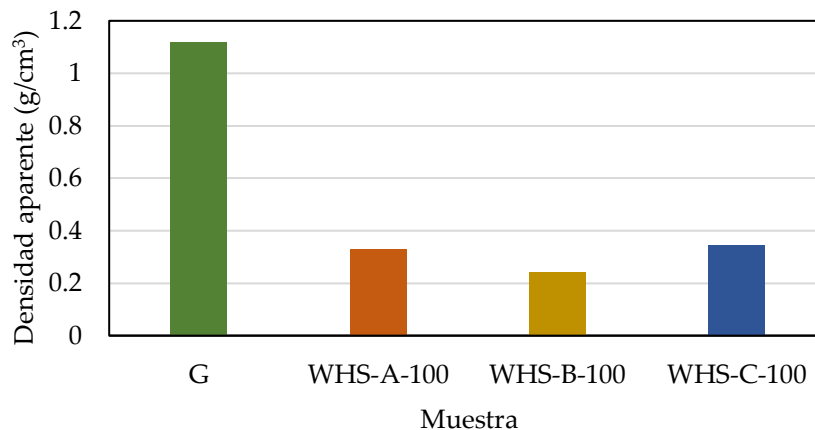


Figura 3.17. Densidad aparente de muestras 100% WHS y G para diferentes tamaños de partículas de WHS.

La densidad aparente está influenciada por los huecos de la muestra, tanto intrapartícula (cavidades, huecos, etc. de las partículas) como interpartícula (espacios entre las partículas). Posiblemente para partículas con un tamaño inferior a 0,5 mm, la cantidad de pulpa del tallo, que es la parte más porosa y esponjosa del tallo (Salas-Ruiz et al., 2019), sea muy significativa, facilitando su compactación, y dando lugar a un material más denso. Por otro lado, cabe suponer que las muestras WHS-C-100, preparadas con partículas de WHS entre 1 y 2 mm, incluyeron un alto porcentaje de la corteza del tallo, la cual presenta menor volumen de poros interpartícula (Salas-Ruiz

et al., 2019), dando lugar, tras su compactación, a un material significativamente más denso. Finalmente, las partículas de WHS entre 0,5 y 1 mm originaron el material menos denso de los tres, sugiriendo que las partículas de WHS con ese rango de tamaños presentaron una proporción de pulpa y corteza de la planta que favoreció la creación de porosidad interpartícula y la no destrucción de porosidad intrapartícula durante la compactación, dando lugar a un material más poroso que los otros dos (ver [Figura 3.18](#)).

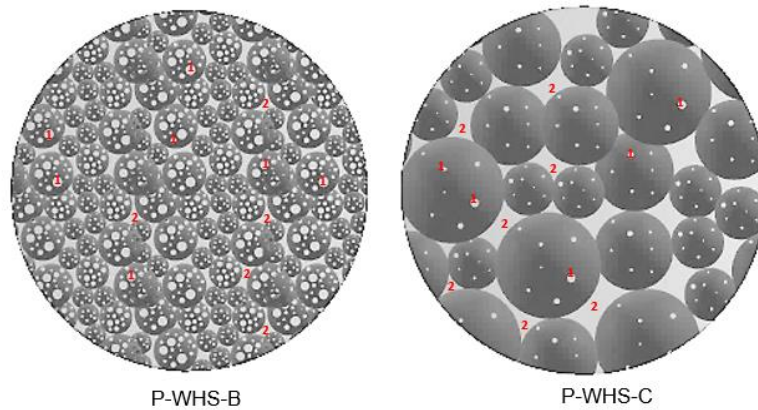


Figura 3.18. Esquema de la posible distribución de huecos intrapartícula (1) e interpartícula (2) dentro de las muestras WHS-B-100 y WHS-C-100.

La [Figura 3.19](#) muestra el valor de la densidad aparente de las muestras compuestas con WHS y yeso a diferentes proporciones de biomasa. Se observa que, para todos tamaños de partícula, la adición de partículas de WHS al yeso disminuye significativamente la densidad del material. En el caso concreto de WHS-B, se ha observado una reducción entre el 2,6% (WHS-B-1) y el 58,5% (WHS-B-50).

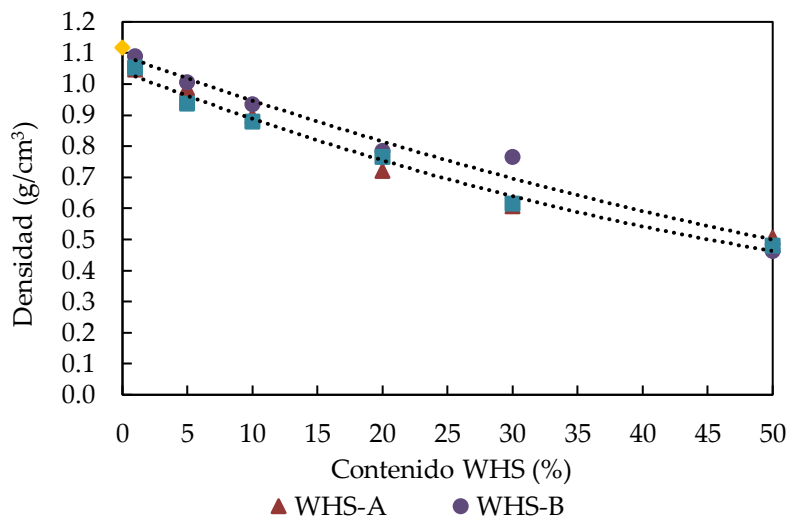


Figura 3.19. Densidad aparente con respecto a los diferentes tamaños de partículas de WHS para materiales compuestos dentro de las clasificaciones A, B y C.

3.4.2.2 Porosidad de las muestras

En la [Tabla 3.5](#) se muestran la porosidad total (%TP), la porosidad abierta (%AP) y la porosidad cerrada (%CP) de las muestras obtenidas de acuerdo con el procedimiento descrito en la sección 3.4.2.2.

Tabla 3.5. Características físicas de los compuestos basados en WHS y G.

Muestra	Tamaño de partícula (mm)	Proporción WHS:G (wt.%)	Densidad aparente (g/cm ³)	Densidad aparente* (g/cm ³)	TP (%)	AP (%)	CP (%)
Aire	-	-	0,001	-	-	-	-
G	1- 2	0:1	1,118	1,171	57,76	39,95	17,86
WHS-A-1	<0,5	1:99	1,047	1,095	60,13	30,83	29,30
WHS-A-5		1:19	0,987	0,985	61,10	36,04	25,06
WHS-A-10		1:9	0,897	0,910	63,15	36,91	26,23
WHS-A-20		1:4	0,720	0,599	68,04	50,61	17,43
WHS-A-30		3:7	0,606	0,406	71,09	51,39	19,70
WHS-A-50		1:1	0,505	0,329	72,54	54,30	18,24
WHS-B-1	0,5-1	1:99	1,089	1,111	58,64	34,24	24,40
WHS-B-5		1:19	1,006	0,997	61,00	37,82	23,18
WHS-B-10		1:9	0,936	0,930	62,78	38,60	24,18
WHS-B-20		1:4	0,786	0,725	67,17	43,80	23,37
WHS-B-30		3:7	0,767	0,739	66,46	44,42	22,03
WHS-B-50		1:1	0,464	0,400	77,84	41,94	35,90
WHS-C-1	1-2	1:99	1,053	1,089	59,72	35,12	24,60
WHS-C-5		1:19	0,937	0,944	62,43	37,24	25,19
WHS-C-10		1:9	0,880	0,898	62,68	38,70	23,98
WHS-C-20		1:4	0,766	0,651	63,90	42,06	21,84
WHS-C-30		3:7	0,617	0,502	68,07	43,60	24,47
WHS-C-50		1:1	0,481	0,393	70,62	38,29	32,34

* Calculada con el método de Arquímedes

Por un lado, para las muestras preparadas solo con WHS, se confirma (ver [Figura 3.20](#)) que como se comentó en la sección 3.5.2.1, la muestra preparada con un rango de tamaños de partícula entre 0,5 y 1 mm (WHS-B) es la que presenta mayor porosidad de las tres. Posiblemente, en las partículas antes de la compactación de WHS-A predominara la pulpa del tallo, lo que favorece la compactación y por tanto la destrucción de porosidad intra e interpartícula. Para la Muestra WHS-C, en la que probablemente predomina la parte menos porosa del tallo, la porosidad resulta tras la compactación mucho menor que para la WHS-B.

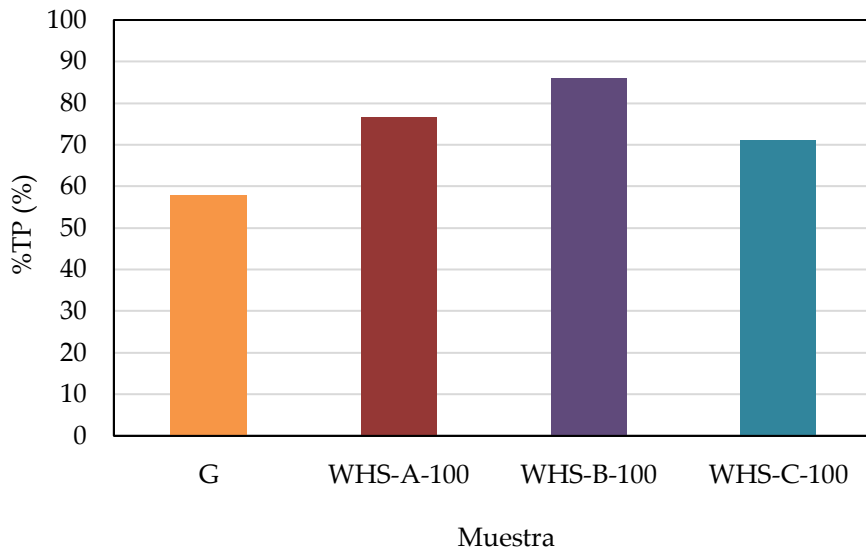


Figura 3.20. Porosidad total (%TP) de los compuestos 100% WHS y G según tamaño de partícula.

Como era de esperar teniendo en cuenta las densidades obtenidas, la porosidad global de las muestras preparadas con WHS y yeso es significativamente mayor que la obtenida para la muestra preparada solo con yeso. Además, esta porosidad se incrementa al aumentar el contenido de WHS en la muestra (ver [Figura 3.21](#)).

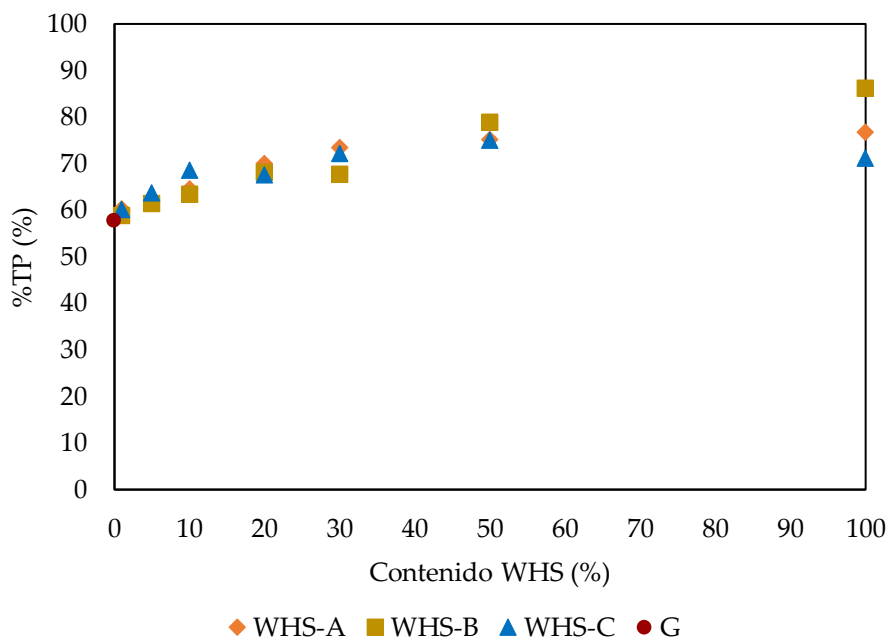


Figura 3.21. Porosidad total (%TP) de los distintos compuestos de WHS:G según proporción WHS:G.

3.5.2.3 Análisis adsorción de N₂

Al objeto de encontrar información más específica sobre el tamaño de los poros presentes en las muestras, éstas fueron analizadas mediante adsorción de N₂ a 77 K, obteniéndose las isothermas que se muestran en la [Figura 3.22](#). En dicha figura puede apreciarse que el N₂ adsorbido crece a lo largo de todo el rango de presiones relativas, lo cual es indicativo de gran variedad de tamaños poros en el rango micro-meso. Asimismo, la muestra A (más pequeña) parece presentar un mayor volumen de poros en el rango de las medias y altas presiones relativas.

A partir de los datos experimentales de adsorción, y aplicando la regla de Gurvitch (Sing, 1982) para la determinación de micro y mesoporos, se hallaron los valores recogidos en la [Tabla 3.6](#). Se observan los valores más altos de mesoporosidad para la muestra WHS-A-100 y G presentó el mayor volumen de microporos.

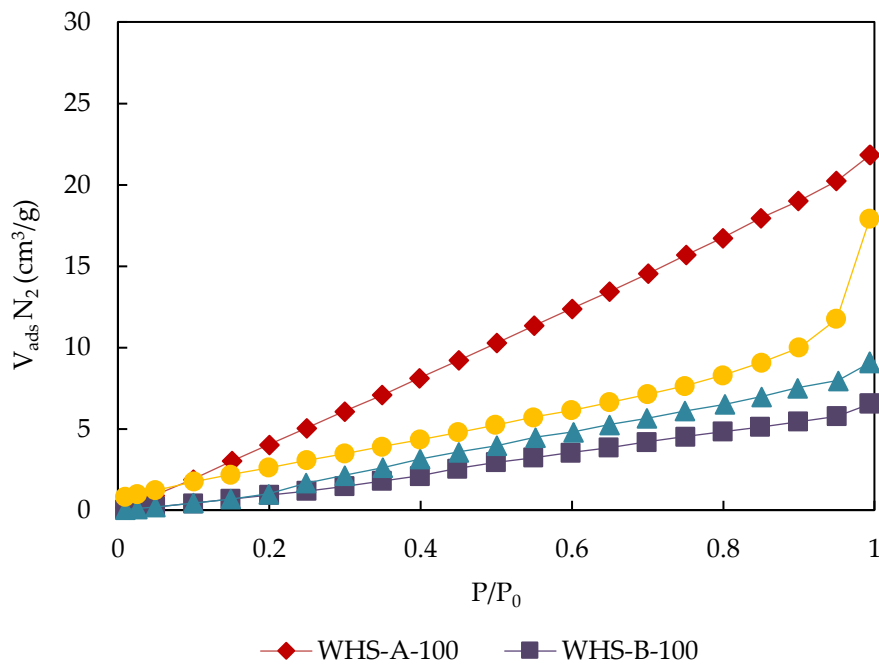


Figura 3.22. Isothermas de adsorción de N₂ a -196 °C.

Tabla 3.6. Valores de porosidad mediante adsorción de N₂.

Muestra	V _{mi} (0.05)	V _{me}	V (0.95)	V (0.99)	V _{mi} /V _{me} (%)
G (Yeso)	0,0019	0,0163	0,0182	0,0277	11,49
WHS-A-100	0,0014	0,0299	0,0313	0,0338	4,77
WHS-B-100	0,0003	0,0086	0,0089	0,0102	3,47
WHS-C-100	0,0003	0,0120	0,0123	0,0140	2,63

3.4.2.6 Análisis de la resistencia mecánica

En la [Figura 3.23](#) se muestran las curvas fuerza-desplazamiento obtenidas en el ensayo de flexión para las probetas preparadas con distintas proporciones WHS:G. Se puede comprobar que el material fabricado con yeso en su totalidad (G) es rígido y resistente. La fase inicial hasta que aparece la primera grieta es lineal con una pendiente pronunciada. Tras aparecer la primera grieta el material rompe fácilmente, pasando directamente de una deformación elástica a la rotura. Estos resultados muestran que, aunque los materiales compuestos presentan una resistencia menor, su elasticidad es mayor, pues aun rompiendo con una fuerza menor, lo hacen más tarde. Como era de esperar, y en coherencia con los estudios de la bibliografía (e.g., Ranesi et al., 2022; Shuvo et al., 2021) a medida que se incrementa el contenido de WHS disminuye la resistencia a flexión. Esto es debido a que el refuerzo debilita la unión entre partículas y provoca que el material rompa aplicando una fuerza menor, si bien rompe más tarde porque la presencia de estas partículas hace que el material sea más elástico. Los valores obtenidos para la resistencia a la flexión o módulo de rotura (MOR) se representan en la [Tabla 3.7](#).

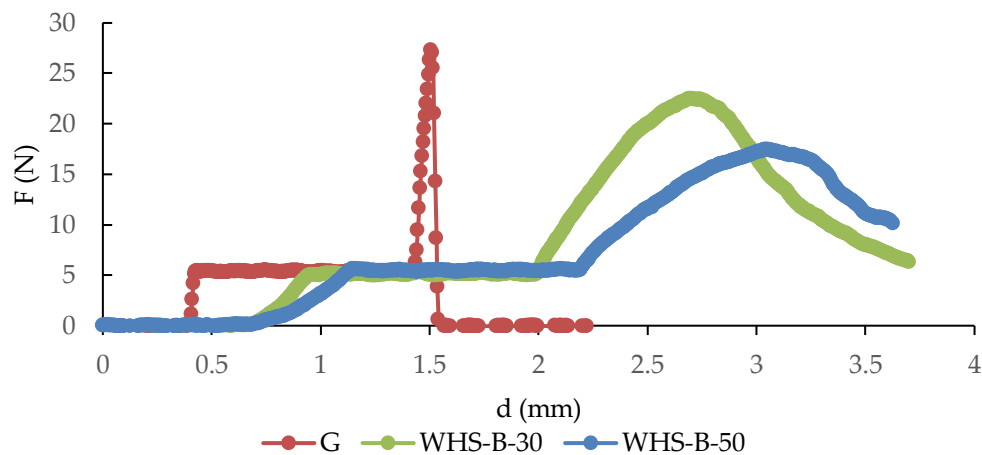


Figura 3.23. Curvas fuerza-desplazamiento obtenidas en el ensayo de flexión.

Tabla 3.7. Propiedades de flexión de los materiales compuestos.

Propiedades	Muestra	G	WH-B-30	WH-B-50
Fuerza de rotura, F_r (N)		35,97	32,18	13,12
MOR (MPa)		1,78	1,11	0,43
MOE (MPa)		18848,25	1848,17	383,46

Los mayores valores se han obtenido para el yeso, mientras que a medida que incorporamos WHS como relleno, estos valores decrecen de forma gradual. La literatura pone de manifiesto que añadir biomasa tiene generalmente esta consecuencia sobre las

propiedades mecánicas, a excepción de aquellos trabajos en los que la biomasa fue añadida en fibras largas, para las que se encontró una mejora del módulo de flexión (Shuvo et al., 2021). Por otra parte, aunque los valores de los materiales compuestos son más bajos que los del yeso, estos valores son superiores a los obtenidos por otros materiales compuestos analizados en otros estudios (Xu et al., 2004).

3.6. SIMULACIÓN DE EFICIENCIA ENERGÉTICA

Como complemento a los estudios térmicos, se llevó a cabo una simulación para comprobar la aplicabilidad del WH mediante el análisis de la eficiencia energética de los muros de la envolvente de una supuesta vivienda unifamiliar, empleado un programa gratuito denominado *Cypetherm HE Plus* concebido para la certificación de la eficiencia energética de edificios y la justificación de las normativas vigentes (Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana del Gobierno de España, 2022). La supuesta vivienda objeto de estudio presenta una superficie total de 188,21 m², con 162,51 m² de vivienda y 25,7 m² de garaje. Además, consta de dos plantas y de los siguientes recintos: un lavadero, dos baños, una cocina, un salón, dos aseos, cuatro dormitorios, un vestíbulo y un pasillo. También se configuraron los datos del emplazamiento donde estaría situada la vivienda unifamiliar tomando la ciudad de Mérida como referencia (ver [Figura 3.24](#)).

Datos del emplazamiento	
Zonificación climática	
Situación	Península
Zona de invierno	C
Zona de verano	4
Localización	
Municipio	Mérida
Provincia	Badajoz
Altitud	227.000 m
Latitud	38.9 grados
Longitud	-6.3 grados
Zona horaria	0.0
Condiciones climáticas SCOP	Clima cálido

Figura 3.24. Datos de la zona climática donde se sitúa la ciudad de Mérida (Badajoz). Los datos de la zona climática han sido obtenidos del CTE (IETCC, 2010).

Para todos los supuestos considerados en el análisis, se han seleccionado como materiales comunes los siguientes:

- Mortero de cemento o cal enlucido con una densidad de 1000-1250 kg/m³, con un espesor de 2 cm y con una conductividad térmica de 0,550 W/mK.
- Medio pie ladrillo métrico o catalán de 6 a 8 cm con un espesor de 15 cm y una conductividad térmica de 0,583 W/mK.
- Lana de vidrio CLIMA 34 de la casa ISOVER Saint-Gobain (2023) como material aislante de la casa con una conductividad térmica de 0,034 W/mK. Sin embargo, el espesor de este material variará entre 6 y 8 cm en cada caso con el fin de reducir el coste empleado en este material.

Mediante esta simulación, se pretende analizar el comportamiento de los muros de la envolvente de esta supuesta vivienda, comparando cuatro casos o configuraciones diferentes:

- Caso 1: los muros de la envolvente se consideran fabricados con los materiales comunes descritos anteriormente, concretamente lana de vidrio CLIMA 34 con un espesor de 8 cm. Además, se incorpora una placa de yeso laminado Placo Saint-Gobain de 1,5 cm de espesor con una conductividad térmica de 0,250 W/mK (ver [Figura 3.25](#)).

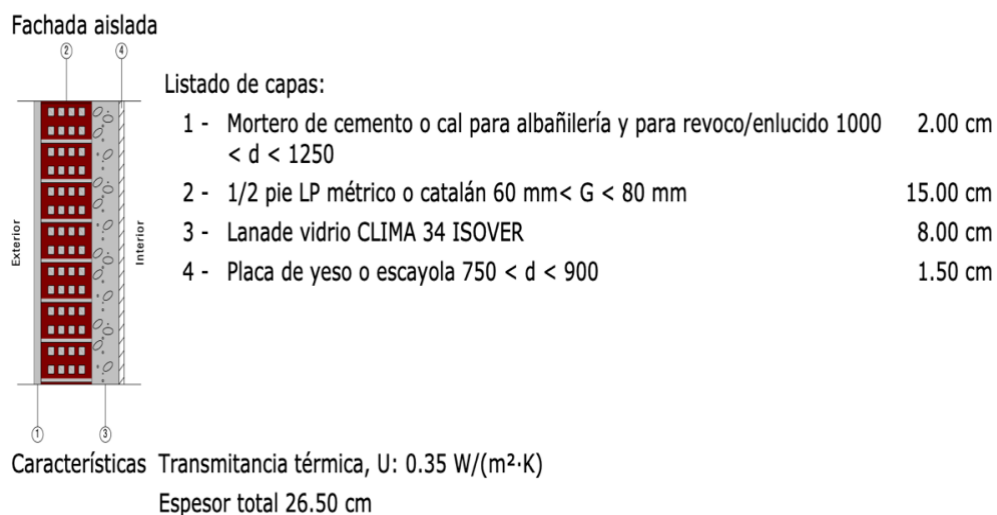


Figura 3.25. Caso 1: Materiales convencionales.

- Caso 2: los muros de la envolvente se consideran fabricados con los materiales comunes, la lana de vidrio con un espesor de 6 cm, una placa de material WHS-B-50 de 2,5 cm de espesor y con una conductividad térmica de 0,269 W/mK, y una placa de yeso laminado Placo Saint-Gobain de 1 cm (ver [Figura 3.26](#)).

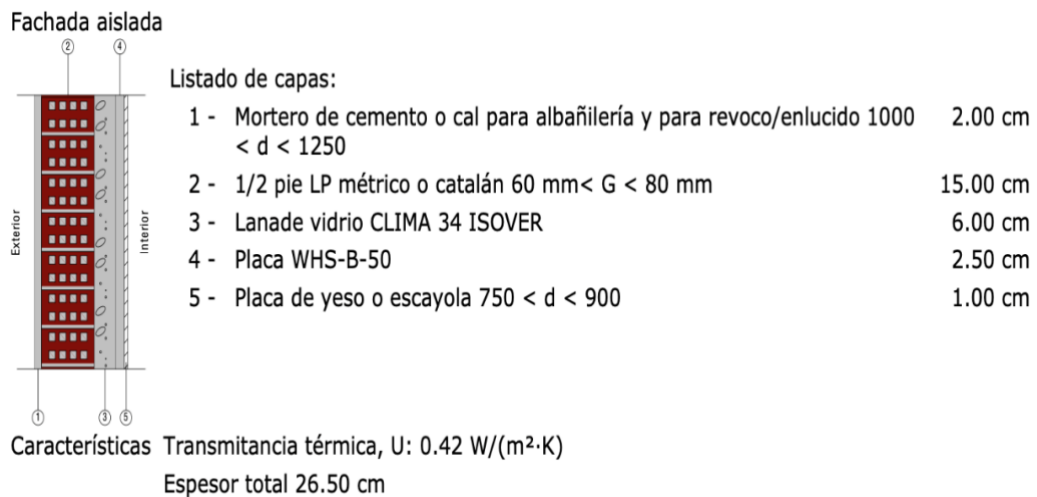


Figura 3.26. Caso 2: Materiales convencionales junto con material a base de yeso y jacinto de agua (WHS-B-50) (2,5 cm de espesor).

- Caso 3: los muros de la envolvente se consideran fabricados con los materiales comunes, lana de vidrio con un espesor de 6 cm, placa de material WHS-B-100 de 2,5 cm de espesor y con una conductividad térmica de 0,183 W/mK, y con placa de yeso laminado Placo Saint-Gobain de 1 cm (ver [Figura 3.27](#)).

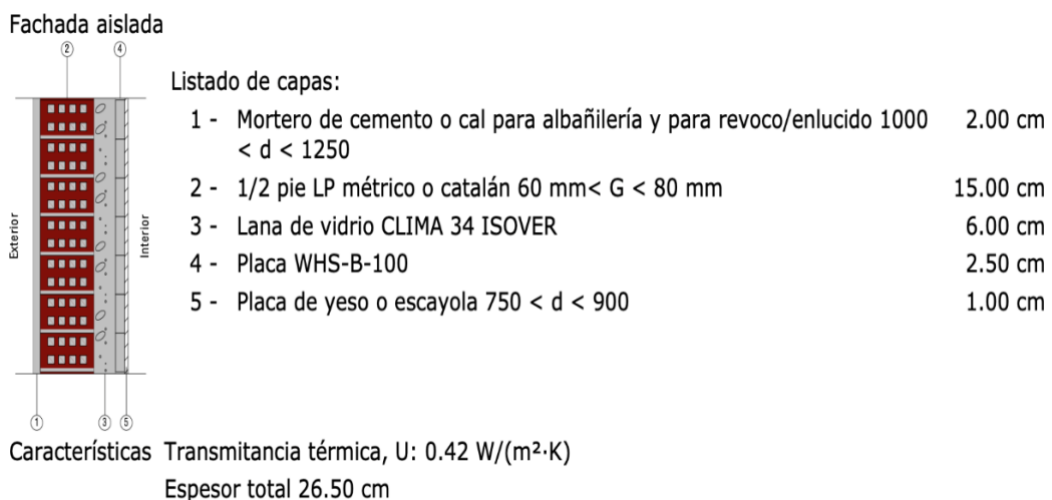


Figura 3.27. Caso 3: Materiales convencionales junto con material a base de jacinto de agua (2,5 cm de espesor).

- Caso 4: además, con fines comparativos, se ha considerado un caso que es una variante del Caso 1, en el que se sustituye todo el material aislante (lana de vidrio) por WHS con un tamaño de partícula igual o inferior a 2 mm, según los resultados obtenidos por Salas-Ruiz et al. (2019) con un valor de conductividad térmica de 0,047 W/mk (ver [Figura 3.28](#)).

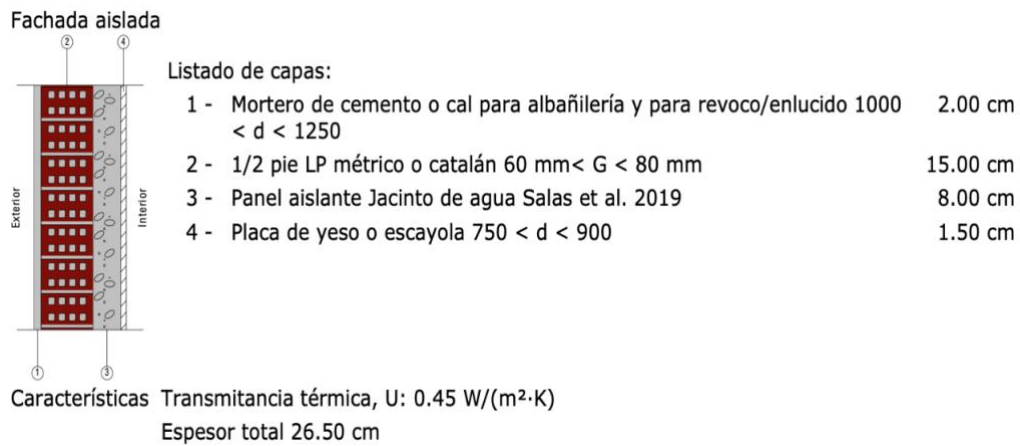


Figura 3.28. Caso 4: sustitución del material aislante por Jacinto de agua.

El estudio se ha completado realizando una estimación económica del ahorro en material aislante, así como una estimación de las emisiones de CO₂ asociadas a dicho ahorro. Los resultados obtenidos en este estudio se detallan en el Capítulo 4 de esta tesis doctoral en la sección 4.5.

3.7. CONCLUSIONES

El trabajo desarrollado en este capítulo se ha centrado, en primer lugar, en describir los materiales y procedimientos experimentales seguidos para la obtención de las muestras objeto de estudio en este trabajo y las técnicas de caracterización utilizadas para su caracterización físico-química. De la caracterización físico-química de los materiales se ha llegado a las siguientes conclusiones:

- Los análisis de caracterización del tallo de camalote seco indican que se trata de un material de elevada materia volátil y bajo contenido en carbono fijo. Su degradación térmica comienza sobre los 200 °C bajo atmósfera inerte y finaliza en torno a los 900 °C. La densidad real de las partículas varía significativamente con el rango de tamaños considerado, siendo esta ligeramente superior para aquellas partículas con menor tamaño (< 0.5 mm).
- Considerando las muestras preparadas íntegramente con WHS, las partículas de WHS en el rango de tamaños entre 0,5 y 1 mm favorecieron la porosidad interpartícula en la muestra, dando lugar al material más poroso de la serie.
- En el caso de los materiales compuestos mezclando yeso y WHS, las muestras con menor densidad y mayor porosidad han sido aquellas preparadas con

partículas de WHS con un tamaño de partícula de 0,5 a 1 mm y un mayor contenido de WHS (1:1).

- Los resultados mostraron que a medida que la cantidad de WHS en referencia al G se incrementa, las propiedades mecánicas del material compuesto disminuyen. Dado que estudios realizados previamente mostraron un notable beneficio en cuanto a las propiedades de aislamiento térmico y acústico a medida que se aumenta la cantidad de jacinto de agua, se pone de manifiesto la necesidad de encontrar una situación de compromiso. Por otro lado, la resistencia a la flexión obtenida fue ligeramente superior a otros resultados encontrados en la bibliografía cuando se utiliza otro tipo de biomasa.

REFERENCIAS

- Ajith, V., y Gopalakrishnan, S. (2013). Wave propagation in a porous composite beam: Porosity determination, location and quantification. *International Journal of Solids and Structures*, 50(3-4), 556-569. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2012.10.020>
- Amalina, F., Razak, A. S. A., Krishnan, S., Zularisam, A. W., y Nasrullah, M. (2022). Water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) for organic contaminants removal in water: A review. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 7, 100092. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100092>
- Ashby, M. F. (2011). Designing hybrid materials. En *Materials Selection in Mechanical Design* (pp. 299-340). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-663-7.00011-4>
- ASTM D7984-16. (2021). ASTM D7984-16. *Standard test method for measurement of thermal effusivity of fabrics using a Modified Transient Plane Source (MTPS) Instrument*. <https://doi.org/10.1520/D7984-21>
- Berger, M. B. (2010). The importance and testing of density/porosity/permeability/pore size for refractories. *The Southern African Institute of Mining and Metallurgy Refractories 2010 Conference*, 101-116. Muldersdrift, Misty Hills, Johannesburgo
- Bhuvaneshwari, M., y Sangeetha, K. (2017). Development of water hyacinth nonwoven fabrics for thermal insulation. *Journal on Future Engineering and Technology*, 13(1), 22. <https://doi.org/10.26634/jfet.13.1.13759>
- Capdevila-Argüelles, L., Zilletti, B., y Álvarez, Suárez, V. A. (2011). *Cambio climático y especies exóticas invasoras en España. Diagnóstico preliminar y bases de conocimiento sobre impacto y vulnerabilidad. Documento de síntesis*. <https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/cambio-climatico/temas/impactos-vulnerabilidad-y->

adaptacion/CC%20y%20Exoticas%20invasoras_tcm30-70264.pdf

- Carrott, P. J. M., Roberts, R. A., y Sing, K. S. W. (1987). Standard nitrogen adsorption data for nonporous carbons. *Carbon*, 25(6), 769-770. [https://doi.org/10.1016/0008-6223\(87\)90148-5](https://doi.org/10.1016/0008-6223(87)90148-5)
- Cayanan, N. D. C., Gozun, S. C., Tongol, E. R. M., y Bautista, L. G. (2019). Hibla: Acoustic fiber. *Proceedings of Meetings on Acoustics*, 39(1), 015002. <https://doi.org/10.1121/2.0001264>
- Chinyere, D. C., Asoegwu, S. N., y Nwandikom, G. I. (2014). An evaluation of briquettes from sawdust and corn starch binder. *The International Journal of Science & Technoledge*, 2(7), 149-157.
- Chornet, E., y Overend, R. P. (1985). *Fundamentals of Thermochemical Biomass Conversion*. Elsevier.
- David, R., Shafi, K. A., V, B., y Aziz S, S. (2022). Experimental investigation of the thermal insulation properties of water hyacinth - rice straw composite materials. *Proceedings of the International Conference on Aerospace & Mechanical Engineering (ICAME 21)*, 1-2. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4102269>
- Daza-Mafioli, C., Coral-Escobar, E. E., y Plaza-Castillo, J. (2019). Medición de la conductividad térmica en materiales aislantes bajo régimen de flujo de calor no estacionario. *Ingeniería y Ciencia*, 15(30), 101-116. <https://doi.org/10.17230/ingciencia.15.30.5>
- El-Wakil, A. E. A., Abd-Elbasseer, M., y M.El-Basheer, T. (2021). Mechanical and acoustical properties of Eichhornia crassipes (water hyacinth) fiber-reinforced styrene butadiene rubber. *Polymer Composites*, 42(8), 3732-3745. <https://doi.org/10.1002/pc.26088>
- Elvaswer, V. F. (2015). Penentuan koefisien absorpsi bunyi dan impedansi akustik dari serat alam eceng gondok (Eichhornia crassipes) dengan menggunakan metode tabung. *Jurnal Ilmu Fisika*, 7(2), 45-49. <https://doi.org/10.25077/jif.7.2.45-49.2015>
- Hankhuntutod, P., Phoo-Ngernkham, T., y Krittacom, B. (2022). Microstructure and mechanical properties of gypsum board produced from water hyacinth fiber. *Materials Science Forum*, 1058, 119-126. <https://doi.org/10.4028/p-a4325q>
- Hernández-Beltrán, J. U., Hernández-De Lira, I. O., Cruz-Santos, M. M., Saucedo-Luevanos, A., Hernández-Terán, F., y Balagurusamy, N. (2019). Insight into pretreatment methods of lignocellulosic biomass to increase biogas yield: Current state, challenges, and opportunities. *Applied Sciences*, 9(18), 3721. <https://doi.org/10.3390/app9183721>

- Confederación Hidrográfica del Guadiana (CHDG). (2020). *El camalote está controlado en todos los tramos del río Guadiana*. Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico. 1-3. https://www.miteco.gob.es/es/prensa/201216elcamaloteestacontroladoentodoslostramosdelrioguadiana_tcm30-520156.pdf
- IETCC. (2010). Catálogo de elementos constructivos del CTE. *Código Técnico de la Edificación CTE, 3*, 141. <https://www.codigotecnico.org/index.html>
- Indulekha, V. P., Thomas, C. G., y Anil, K. S. (2019). Utilization of water hyacinth as livestock feed by ensiling with additives. *Indian Journal of Weed Science*, 51(1), 67. <https://doi.org/10.5958/0974-8164.2019.00014.5>
- Islam, M. N., Rahman, F., Papri, S. A., Faruk, M. O., Das, A. K., Adhikary, N., Debrot, A. O., y Ahsan, M. N. (2021). Water hyacinth (*eichhornia crassipes* (mart.) solms.) as an alternative raw material for the production of bio-compost and handmade paper. *Journal of Environmental Management*, 294, 113036. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113036>
- ISO. (1998). ISO 10534-2:2002. *Acoustics: Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedances tubes. Part 2: Transfer-function method.*, 1-27. <https://www.iso.org/standard/22851.html>
- Isover. (2023). *Lana mineral Clima 34*. ISOVER - Saint Govain. <https://www.isover.es/products/isover-clima-34>
- Jaktorn, C., y Jiajitsawat, S. (2014). Production of thermal insulator from water hyacinth fiber and natural rubber latex. *International Journal of Science*, 11(2), 31-41.
- Le, A. T., Gacoin, A., Li, A., Mai, T. H., Rebay, M., y Delmas, Y. (2014). Experimental investigation on the mechanical performance of starch-hemp composite materials. *Construction and Building Materials*, 61, 106-113. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.084>
- Li, F., He, X., Srishti, A., Song, S., Tan, H. T. W., Sweeney, D. J., Ghosh, S., y Wang, C.-H. (2021). Water hyacinth for energy and environmental applications: A review. *Bioresource Technology*, 327, 124809. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124809>
- Lin, S., Huang, W., Yang, H., Sun, S., y Yu, J. (2020). Recycling application of waste long-root *Eichhornia crassipes* in the heavy metal removal using oxidized biochar derived as adsorbents. *Bioresource Technology*, 314, 123749. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123749>
- Madsen, B., Thygesen, A., y Lilholt, H. (2007). Plant fibre composites – porosity and volumetric interaction. *Composites Science and Technology*, 67(7-8), 1584-1600.

- <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.07.009>
- Madsen, B., Thygesen, A., y Lilholt, H. (2009). Plant fibre composites – porosity and stiffness. *Composites Science and Technology*, 69(7-8), 1057-1069. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2009.01.016>
- Mansour, G., Zoumaki, M., Tsongas, K., y Tzetzis, D. (2020). Starch-sandstone materials in the construction industry. *Results in Engineering*, 8, 100182. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2020.100182>
- Merli, F., Belloni, E., y Buratti, C. (2021). Eco-sustainable wood waste panels for building applications: Influence of different species and assembling techniques on thermal, acoustic, and environmental performance. *Buildings*, 11(8), 361. <https://doi.org/10.3390/buildings11080361>
- Methacanon, P., Weerawatsophon, U., Sumransin, N., Prahsarn, C., y Bergado, D. T. (2010). Properties and potential application of the selected natural fibers as limited life geotextiles. *Carbohydrate Polymers*, 82(4), 1090-1096. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.06.036>
- Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana. (2022). DB HE - Ahorro de energía. *Código Técnico de la Edificación*, 1-129. <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HE/DBHE.pdf>
- MITECO. (2019). *Estrategia de gestión, control y posible erradicación del camalote (eichhornia crassipes)*. https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/publicaciones/estrategiadegestioneicrassipes3deoctubre2019_tcm30-502314.pdf
- MITECO. (2021). *Estrategia para la lucha contra la especie invasora Eichhornia crassipes en la cuenca del Guadiana*. https://www.chguadiana.es/sites/default/files/2021-05/revisi%c3%93n_estrategia%20camalote%202021_completa%20firmada.pdf
- Muigai, H. H., Bordoloi, U., Hussain, R., Ravi, K., Moholkar, V. S., y Kalita, P. (2021). A comparative study on synthesis and characterization of biochars derived from lignocellulosic biomass for their candidacy in agronomy and energy applications. *International Journal of Energy Research*, 45(3), 4765-4781. <https://doi.org/10.1002/er.6092>
- Nguyen, T. T. Van, Tri, N., Tran, B. A., Dao Duy, T., Nguyen, S. T., Nguyen, T. A., Phan, A. N., Mai Thanh, P., y Huynh, H. K. P. (2021). Synthesis, characteristics, oil adsorption, and thermal insulation performance of cellulosic aerogel derived from water hyacinth. *ACS Omega*, 6(40), 26130-26139. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c03137>

- Philip, S., y Rakendu, R. (2020). Thermal insulation materials based on water hyacinth for application in sustainable buildings. *Materials Today: Proceedings*, 33, 3803-3809. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.219>
- Ranesi, A., Faria, P., Correia, R., Freire, M. T., Veiga, R., y Gonçalves, M. (2022). Gypsum mortars with acacia dealbata biomass waste additions: Effect of different fractions and contents. *Buildings*, 12(3), 339. <https://doi.org/10.3390/buildings12030339>
- Rezania, S., Ponraj, M., Din, M. F. M., Songip, A. R., Sairan, F. M., y Chelliapan, S. (2015). The diverse applications of water hyacinth with main focus on sustainable energy and production for new era: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 943-954. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.09.006>
- Rohman, M. H., Marwoto, P., y Priatmoko, S. (2022). A study of sound materials of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) as alternative steam integrated project-based learning model (PJBL). *Jurnal Penelitian & Pengembangan Pendidikan Fisika*, 8(1), 11-22. <https://doi.org/10.21009/1.08102>
- Román, S., Ledesma, B., Álvarez, A., Coronella, C., y Qaramaleki, S. V. (2020). Suitability of hydrothermal carbonization to convert water hyacinth to added-value products. *Renewable Energy*, 146, 1649-1658. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.157>
- Salas-Ruiz, A., y Barbero-Barrera, M. M. (2019). Performance assessment of water hyacinth–cement composite. *Construction and Building Materials*, 211, 395-407. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.217>
- Salas-Ruiz, A., Barbero-Barrera, M. M., y Ruiz-Téllez, T. (2019). Microstructural and thermo-physical characterization of a water hyacinth petiole for thermal insulation particle board manufacture. *Materials*, 12(4), 560. <https://doi.org/10.3390/ma12040560>
- Setyowati, E., Hardiman, G., y Grafiana, N. F. (2021). The acoustical performance of water hyacinth based porous-ceramic compared to the biomass fiber composites for architecture application. *Civil Engineering and Architecture*, 9(1), 139-149. <https://doi.org/10.13189/cea.2021.090112>
- Setyowati, E., Yahya, I., Supriyo, E., Romadhona, I. C., y Minardi, A. (2018). On the sound absorption improvement of water hyacinth and coconut husk based fiber reinforced polymer panel. *MATEC Web of Conferences*, 159. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201815901004>
- Sharma, A., Singh, P. K., y Sharma, V. K. (2021). Analysis on WH cement composite thermal insulation material for increasing efficiency of building. *Materials Today: Proceedings*, 45, 3036-3041. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.056>

- Shuvo, I. I., Hoque, M. S., Shadhin, M., y Khandakar, L. K. M. (2021). Flexural strength and load–deflection behaviour of hybrid thermoset composites of wood and canola biopolymers. *Advanced Fiber Materials*, 3(5), 331-346. <https://doi.org/10.1007/s42765-021-00089-5>
- Sing, K. S. W. (1982). Reporting physisorption data for gas/solid systems. *Pure and Applied Chemistry*, 54(11), 2201-2218. <https://doi.org/10.1351/pac198254112201>
- Singh, A., y Bishnoi, N. R. (2013). Comparative study of various pretreatment techniques for ethanol production from water hyacinth. *Industrial Crops and Products*, 44, 283-289. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.11.026>
- Sruti, N. M. K. S., Jenaneswari, P. R., Rahayu, M. R., y Syamani, F. (2021). Utilization of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) and corncob (*zea mays*) in epoxy-based biocomposite board for cool box thermal insulation material. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 891(1), 012001. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/891/1/012001>
- Sukarni, S., Mufti, N., Permanasari, A. A., Ardianto, R. E., y Johari, A. (2020). The fitting kinetic evaluation during co-pyrolysis of coal and water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) to explore its potential for energy. *AIP Conference Proceedings*, 2255. <https://doi.org/10.1063/5.0013548>
- Sukhawipat, N., Saengdee, L., Pasetto, P., Junthip, J., y Martwong, E. (2022). Sustainable rigid polyurethane foam from wasted palm oil and water hyacinth fiber composite—a green sound-absorbing material. *Polymers*, 14(1), 201. <https://doi.org/10.3390/polym14010201>
- Sukhawipat, N., Yingshataporn-A-Nan, T., Minanandana, T., Puksuwan, K., Saengdee, L., Nakaramontri, Y., Sosa, N., y Saetung, N. (2021). Effects of water hyacinth fiber size on sound absorption properties of advanced recycled palm oil-based polyurethane foam composite. *Materials Today: Proceedings*, 52, 2409-2413. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.417>
- Talkah, A. (2015). Effect of organic fertilizer water hyacinth on the growth and production of taro [*colocasia esculenta* (L.) schott]. *Journal of Environment and Earth Science*, 5(22), 70-74.
- Tam, D. K. Y., Ruan, S., Gao, P., y Yu, T. (2012). High-performance ballistic protection using polymer nanocomposites. En Spark, E. (Ed.), *Advances in Military Textiles and Personal Equipment* (pp. 213-237), Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9780857095572.2.213>
- Taqi, Z. J., Hamad Mohammed, A., y Jabir, M. S. (2019). Biomedical applications of

- eichhornia crassipes. *Research Journal of Biotechnology*, 14(1), 156-159.
- Téllez, T. R., López, E., Granado, G., Pérez, E., López, R., y Guzmán, J. (2008). The water hyacinth, eichhornia crassipes: An invasive plant in the Guadiana river basin (spain). *Aquatic Invasions*, 3(1), 42-53. <https://doi.org/10.3391/ai.2008.3.1.8>
- UNE-EN-ISO. (2022). UNE-EN-ISO 18754:2020. *Cerámicas técnicas (cerámicas avanzadas, cerámicas técnicas avanzadas). Determinación de la densidad y de la porosidad aparente*. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=norma-une-en-iso-18754-2022-n0069596>
- UNE-EN. (2013). UNE-EN 12089:2013. *Productos aislantes térmicos para aplicaciones en la edificación. Determinación del comportamiento a flexión*. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0052070>
- Wang, S., Dai, G., Yang, H., y Luo, Z. (2017). Lignocellulosic biomass pyrolysis mechanism: A state-of-the-art review. *Progress in Energy and Combustion Science*, 62, 33-86. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2017.05.004>
- Xu, J., Sugawara, R., Widyorini, R., Han, G., y Kawai, S. (2004). Manufacture and properties of low-density binderless particleboard from kenaf core. *Journal of Wood Science*, 50(1), 62-67. <https://doi.org/10.1007/s10086-003-0522-1>
- Yin, X., Wang, Y., Wei, L., Huang, H., y Zhou, C. (2022). Reduced cadmium (Cd) accumulation in lettuce plants by applying KMnO₄ modified water hyacinth biochar. *Heliyon*, 8, e11304. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11304>
- Zanella, K., Gonçalves, J. L., y Taranto, O. P. (2016). Charcoal briquette production using orange bagasse and corn starch. *Chemical Engineering Transactions*, 49(2004), 313-318. <https://doi.org/10.3303/CET1649053>
- Zimmels, Y., Kirzhner, F., y Malkovskaja, A. (2006). Application of Eichhornia crassipes and Pistia stratiotes for treatment of urban sewage in Israel. *Journal of environmental management*, 81(4), 420-428. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.11.014>



CAPÍTULO 4

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE
MATERIALES COMPUESTOS BASADOS EN TALLO DE JACINTO DE
AGUA (EICHHORNIA CRASSIPES)**

Resumen del capítulo

El compromiso de disminuir los consumos energéticos a nivel global se ha plasmado en las sucesivas reformas de los códigos técnicos de edificación a nivel nacional e internacional. A tal fin, la búsqueda de materiales que permitan disminuir el coeficiente global de transmisión de calor, con una baja conductividad térmica, suponen un reto. Al mismo tiempo, el elevado gasto energético que conlleva a producción de materiales constructivos y aislantes basados, además, en materiales de origen finitos motiva la investigación de nuevos recursos renovables, máxime cuando estos pueden ser considerados como residuos de actividades forestales o agroindustriales. El presente capítulo se ha centrado en la evaluación de las propiedades de transmisión de calor de las muestras de materiales preparadas a base de camalote, en diferentes condiciones experimentales (tamaño de partícula, proporción en mezcla, carga aplicada y tipo de aglutinante). La combinación de la conductividad térmica con otras propiedades, como la densidad, la composición lignocelulósica (en el caso del estudio de tamaño de partícula) y la porosidad, ha permitido establecer relaciones entre ellas, y encontrar condiciones óptimas.

CONTENIDO

4.1. INTRODUCCIÓN	151
4.2. FUNDAMENTO TEÓRICO.....	156
4.2.1. El aislamiento térmico	156
4.2.2. Método del estado transitorio	161
4.3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	163
4.3.1. Materiales	163
4.3.2. Técnicas de caracterización.....	165
4.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	166
4.4.1. Muestras preparadas únicamente con WHS.....	166
4.4.2. Muestras a base de yeso	170
4.4.3. Muestras a base de otros materiales constructivos	175
4.6. CONCLUSIONES	180
REFERENCIAS	182

4.1. INTRODUCCIÓN

La eficiencia energética de los edificios, en cuanto a la disminución del consumo derivada del mejor diseño de las construcciones, incluyendo las propiedades de los elementos constructivos de la envolvente, es un tema de interés de suma importancia a nivel global. En el caso de España, el compromiso en este particular viene señalado por el *Código Técnico de la Edificación* (CTE) (Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana del Gobierno de España, 2022) establecido y actualizado periódicamente por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE, 2023). Además, el aumento de la temperatura media del planeta es un fenómeno global que hace necesario consumir más energía en estaciones cálidas para alcanzar confort en los hogares.

A nivel mundial, el consumo de energía se encuentra en constante crecimiento; como se muestra en la [Figura 4.1](#), donde se representa la evolución del consumo mundial total desde el año 2000 hasta 2020. Según la [Figura 4.1](#), y a pesar de los esfuerzos por impulsar las fuentes de energía renovables, los combustibles fósiles siguen siendo la principal fuente de energía (80%) (Li, 2023).

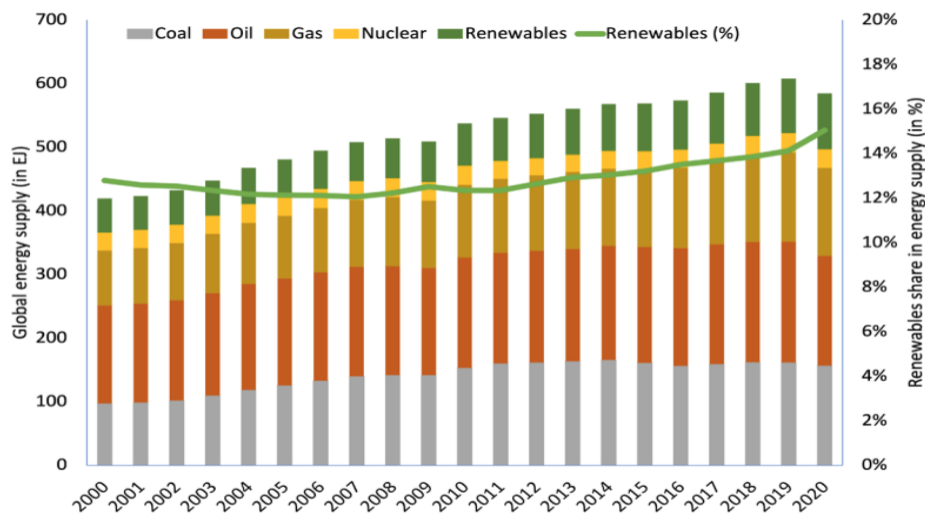


Figura 4.1. Participación en el consumo final mundial total por fuente en el periodo 2000-2020.
Fuente: Li (2023)

A nivel mundial, si comprobamos el consumo total de energía por sectores de las distintas fuentes de energía, se puede afirmar que el gas natural y la electricidad son las fuentes de energía que tienen un mayor consumo residencial (IEA, 2021). Concretamente, y según la *Agencia Internacional de la Energía* (AIE) un 29,7% es de consumo de gas natural y un 26,6% de consumo de electricidad (ver [Figura 4.2](#)) (IEA, 2021).

Si tenemos en cuenta los mayores usos de energía por sector, representados en la [Figura 4.2](#), encontramos los sectores de la industria y residencial como los más demandantes de energía derivada de electricidad y gas natural. En concreto, la industria aparece en primer lugar con un 41,9 y 37,42% de participación, respectivamente. El sector residencial aparece en segundo lugar con una participación entre el 26,6 y 29,7%. Esto nos sugiere la importancia de conseguir que la energía empleada en estos sectores sea energía procedente de fuentes de energía renovable y no fósil. El sector residencial, donde predomina el uso de energía debido a por calefacción y electrodomésticos, tiene una gran participación en el consumo de energía, principalmente en países europeos (IEA, 2021). La calefacción de espacios representó más de la mitad (53,4%) del consumo de energía en el sector residencial (IEA, 2021).

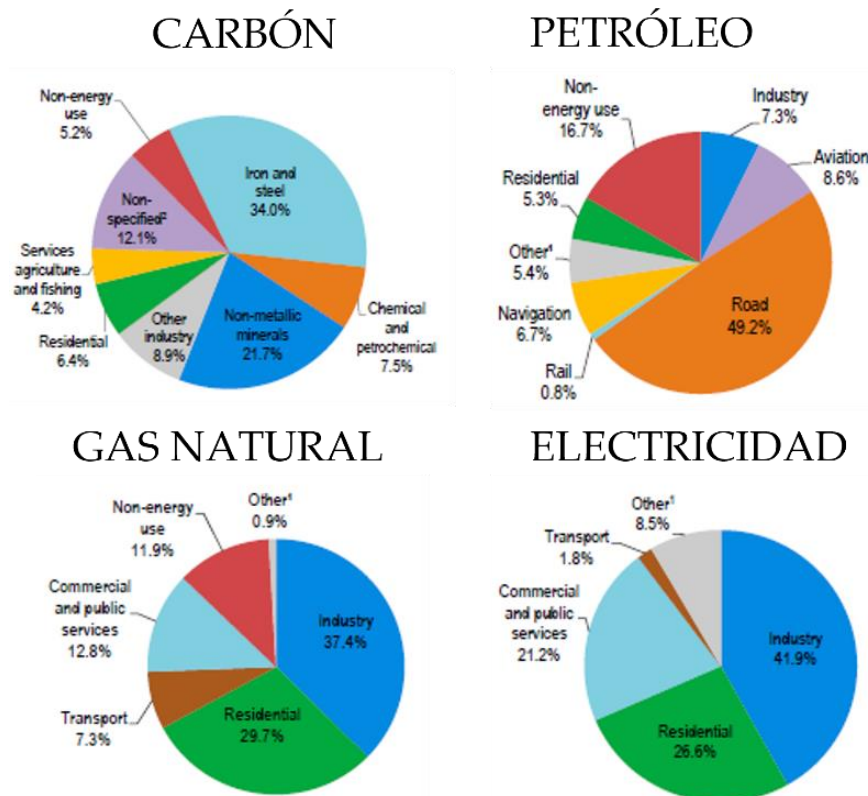
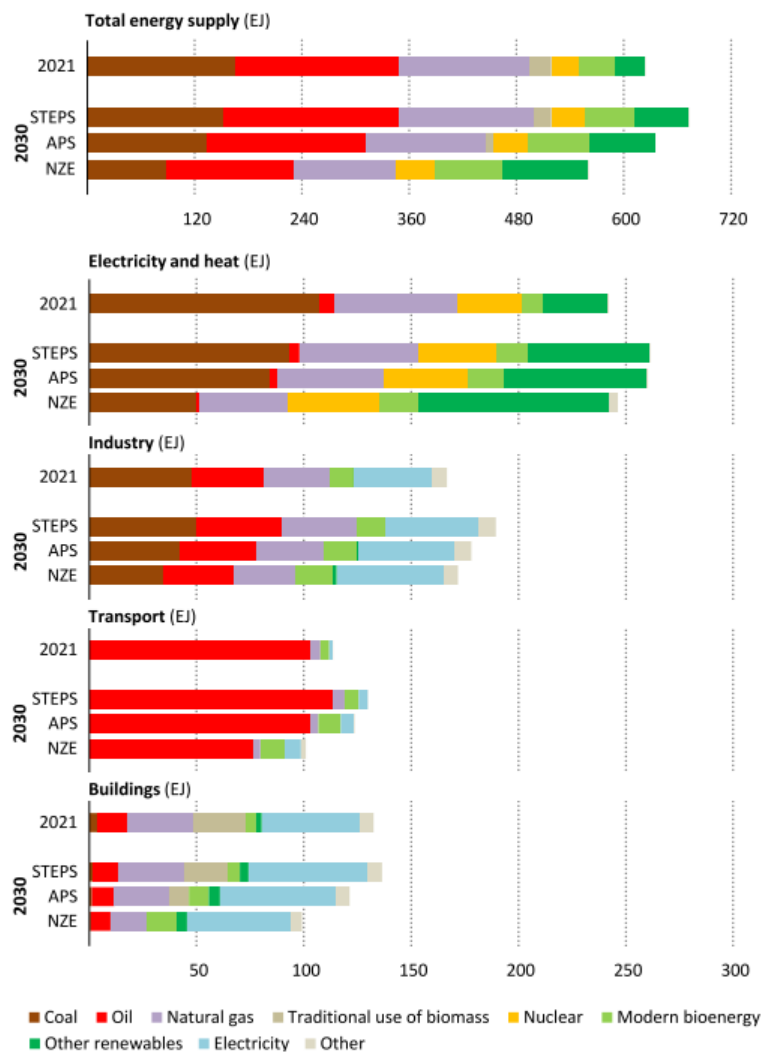


Figura 4.2. Participación en el consumo final mundial de las distintas fuentes de energía en 2021. Fuente: IEA (2021)

La [Figura 4.3](#) muestra las previsiones de consumo energético de los sectores, así como la tendencia hacia el concepto “Emisiones Netas Cero ” (NZE, *Net Zero Emission*), que, aplicado a la edificación implica aquellas construcciones que combinan un diseño que minimiza el consumo energético con el aporte de energías renovables y sistemas de climatización de muy bajo consumo, como la aerotermia (Li, 2023).



IEA. CC BY 4.0.

Figura 4.3. Oferta y demanda mundial de energía (hexajulios) por sectores, escenarios y combustibles. Acrónimos: STEPS (Stated Policies Scenario), APS (Announced Pledges Scenario), NZE (Net Zero Emissions). Fuente: Li (2023)

Según la AIE (IEA, 2021), la eficiencia energética para la calefacción residencial ha mejorado con respecto al año 2000, principalmente debido al mejor aislamiento de los edificios (ver [Figura 4.4](#)). Esto sugiere que una de las posibles soluciones para conseguir paliar el cambio climático se encuentra en la mejora del aislamiento de edificios.

Aun encontrándonos en la línea adecuada en cuanto al progreso de la eficiencia energética, la tasa de mejora debe duplicarse desde los niveles actuales para igualar la ganancia descrita en el escenario de NZE para 2050 de la Agencia Internacional de la Energía (IEA, 2021). En este contexto, la Ley de Transición Energética para el Crecimiento Verde de 2015 ha establecido ciertos objetivos con el fin de disminuir el consumo de energía, las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y los residuos

(IEA, 2021). Normalmente, los impactos ambientales generados por un edificio radican derivan de la energía destinada al uso de agua caliente sanitaria, la iluminación, el aire acondicionado, la calefacción, etc.; así como de los materiales de construcción que fueron empleados en su construcción, su transporte, la gestión de desechos posterior, etc. Por ello, para reducir el consumo de energía y las emisiones de GEI, se han diseñado diversas soluciones entre las que se encuentran tanto el uso de materiales más ecológicos derivados de la silvicultura o la agricultura, como y el reciclaje (Rabbat et al., 2022).

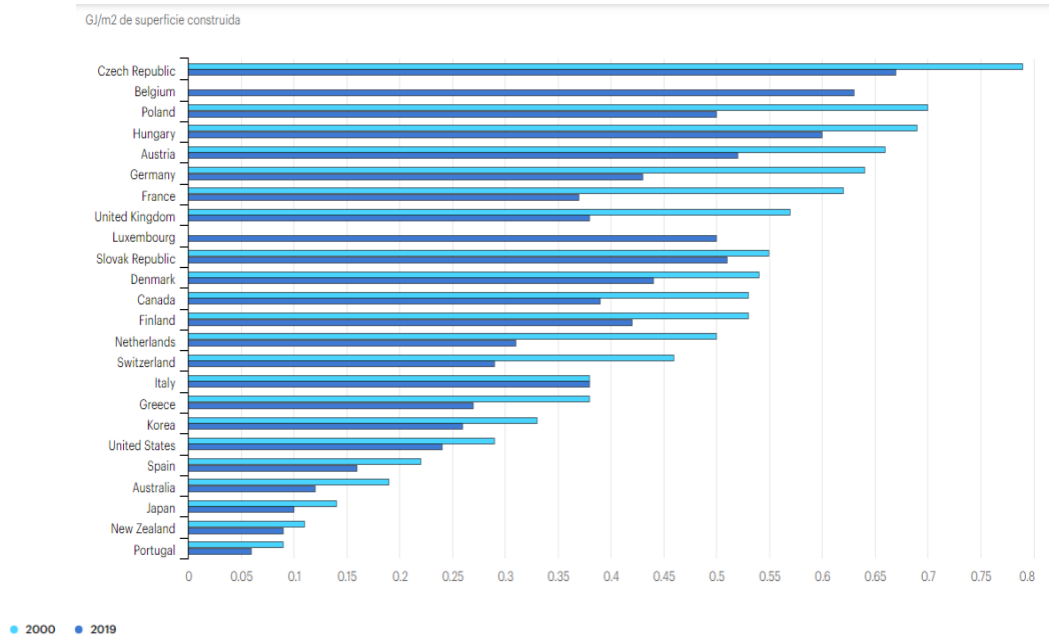


Figura 4.4. Intensidad energética de la calefacción de espacios residenciales, 2000-2019. Fuente: IEA (2021).

En este contexto, por tanto, el uso de biomásas para la fabricación de compuestos que puedan mejorar el aislamiento térmico de una vivienda ha surgido como un tema de interés (Liu et al., 2017, 2022; Rabbat et al., 2022). Empleando biomasa residual se hace frente al impacto medioambiental que se produce al emplear materiales convencionales, como la lana de vidrio o polímeros basados en combustibles fósiles, al tiempo que se da salida a un residuo que de otro modo sería preciso gestionar (a menudo mediante acumulación y quema al aire libre). Existen varios ejemplos en la literatura que han mostrado la eficacia de materiales de biomasa como aislantes térmicos (Liu et al., 2017; Rabbat et al., 2022). En general, como describen Liu et al. (2017), este tipo de precursores provienen de actividades de agricultura (cáscaras, fibras, astillas, etc.), forestales (corcho o maderas), subproductos de origen animal (lanas o plumaje) o materiales reciclados que provienen los primeros, a partir de actividades industriales (residuos textiles, papel y otros).

Entre las biomásas estudiadas hasta la fecha se encuentra el jacinto de agua (WH, por sus siglas en inglés *water hyacinth*), que ha sido investigado como potencial material para el aislamiento térmico, fundamentalmente debido a su baja densidad y gran abundancia (Salas-Ruiz et al., 2019). Sin embargo, la investigación sobre esta biomasa es muy limitada (Bhuvaneshwari y Sangeetha, 2017b, 2017a; Salas-Ruiz et al., 2019). Por un lado, son pocos los trabajos que analizan las fibras del tallo de WH (Salas-Ruiz et al., 2019) o en forma de fieltro (Bhuvaneshwari y Sangeetha, 2017a, 2017b) sin aglutinante como potencial material para aislamiento térmico.

Varios trabajos estudian el comportamiento térmico de materiales preparados con fibras de WH mezcladas con otras biomásas (David et al., 2022; Mendoza y Co, 2019; Niyasom y Tangboriboon, 2021; Sruti et al., 2021), o incluso se han obtenido otros materiales a partir de WH, como los aerogeles (T. T. Van Nguyen et al., 2021). Hay muy pocos trabajos investigando el cemento como material constructivo mezclado con WH (Philip y Rakendu, 2020; Sala-Ruiz y Barbero-Barrena, 2019; Sharma, 2021). Por ejemplo, Philip y Rakendu (2020) estudiaron el comportamiento térmico de paneles de petiolo (rabillos de las hojas, 2,36 mm) de WH mezclados con cemento, en un único ratio WH/cemento (60/100% en peso), y encontraron que la adición de esta biomasa provocaba un significativa disminución de la densidad, y de la conductividad térmica de los paneles preparados. En concreto reportaron valores en torno a los 0,0765 W/mK para los basados en WH/cemento, que son valores significativamente más bajos que los obtenidos para el cemento puro (0,7 W/m °C). Por otro lado, Sharma y col. (2019) estudiaron mezclas de WH (2 mm) y hormigón, dando lugar a disminuciones de la conductividad térmica de hasta 0,045 W/m °C. Asimismo, se han estudiado las propiedades mecánicas y térmicas de WH mezclado con otros materiales; es el caso de las investigaciones de Jaktorn y Jiajitsawat (2014) que mezclaron el WH y la goma de latex natural, o Sruti et al. (2021) que utilizaron resina epoxy. Finalmente, a fecha de cierre de esta tesis, sólo hemos identificado un trabajo dedicado al estudio de bioaislantes a base de tallo de camalote con yeso (Hankhuntut et al., 2022). En este estudio los valores de la conductividad de los materiales basados en yeso y WH se encontraban en torno a las 0,15 y 0,25 W/mK empleando ratios de WH: GP de 0,50,75, 100 y 150. Además, los autores midieron el contenido en agua en las muestras y observaron que a mayor cantidad de WH en el material mayor contenido de agua, y que al aumentar el contenido de fibra de WH, la conductividad térmica del material disminuye.

Salvo el estudio de Sharma y col. (2019) y Salas y col. (2019) que abordaron las propiedades mecánicas e higroscópicas además de las térmicas, se echan en falta trabajos que hayan contemplado para el mismo material, el análisis de las propiedades térmicas

y acústicas. Asimismo, los estudios no abarcan sistemáticamente la modificación de diferentes variables durante el proceso de obtención del material como son tamaño de partícula, proporción de biomasa, carga aplicada o tipo de aglutinante.

El objetivo perseguido en este capítulo es estudiar las características térmicas de distintos materiales basados en WHS, así como otras propiedades directamente involucradas en el comportamiento térmico del material como son la densidad y la porosidad. Estos materiales serán preparados con partículas de tallo de WH compactados o en combinación con otros materiales constructivos (yeso y cemento) y ligantes (cola blanca y almidón de maíz). Asimismo, se estudiará la influencia en el valor de la conductividad de los materiales compuestos preparados con los siguientes parámetros: tamaño de partículas de WHS, método de preparación de las muestras, cantidad de WH en el producto final y composición de las muestras.

4.2. FUNDAMENTO TEÓRICO

4.2.1. EL AISLAMIENTO TÉRMICO

Según Al-Homoud (Al-Homoud, 2005), el aislamiento térmico, puede definirse como *“la incorporación estratégica de un material o una combinación de materiales que tiene como resultado la disminución del flujo de calor por conducción, convección y radiación”*. Las soluciones de aislamiento térmico son consideradas como medidas eficaces para el ahorro energético (Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana del Gobierno de España, 2022) y se utilizan en muchos ámbitos, como la construcción, la industria y el transporte. En el contexto de la construcción orientada a la sostenibilidad y la eficiencia, el aislamiento térmico juega un papel central (Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana del Gobierno de España, 2022). Este concepto abarca un conjunto de principios de diseño y empleo de materiales que se desarrollan para mitigar la transferencia de calor entre ambientes que, naturalmente y de acuerdo con las leyes de la termodinámica, tienden a nivelar sus temperaturas (Holman, 1999; Yang, 2004).

Según el Documento Básico de Ahorro de Energía (DB H1) del Código Técnico de la Edificación en España, *“los edificios dispondrán de una envolvente térmica de características tales que limite las necesidades de energía primaria para alcanzar el bienestar térmico en función de la zona climática de su ubicación, del régimen de verano y de invierno, del uso del edificio y, en el caso de edificios existentes, del alcance de la intervención.”* La envolvente térmica es el conjunto de elementos constructivos que encierran los espacios habitables de un edificio (Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana del Gobierno de

España, 2022). Estos elementos constructivos deben ser fabricados con materiales que reduzcan el flujo de calor, evitando la transferencia de un sistema con el ambiente (Canto et al., 2018). Estos materiales, denominados comúnmente materiales aislantes térmicos deben cumplir ciertos requisitos estándar que incluyen no solo características térmicas y de durabilidad, sino también la resistencia a los esfuerzos mecánicos (que puede variar según la aplicación del aislante), al agua, a la permeabilidad del agua o al fuego (Jelle, 2011). En la [Tabla 4.1](#) se exponen los principales requisitos que se persiguen para los futuros materiales y soluciones de aislamiento térmico de alto rendimiento.

Tabla 4.1. Requisitos deseables para los materiales de aislamiento térmico de alto rendimiento.

Propiedad seleccionada	Requisito
Conductividad térmica - virgen	< 0,04 W/mK
Conductividad térmica – después de 100 años	< 0,05 W/mK
Conductividad térmica- después de una perforación moderada	< 0,04 W/mK
Vulnerabilidad a la perforación	No influirá significativamente
Posibilidad de cortar para adaptar al tamaño del edificio	Sí
Resistencia mecánica (p.e. compresión y tracción)	Puede variar
Protección contra incendios	Puede variar, depende de otras protecciones
Emisión de humos durante el incendio	Cualquier gas tóxico que se identifique
Durabilidad al envejecimiento climático	Resistente
Ciclos de congelación/descongelación	Resistente
Resistencia al agua	Resistente
Permeabilidad al agua	Puede variar
Aislamiento térmico dinámico	Deseable como objetivo final
Costes frente a otros materiales de aislamiento térmico	Competitivo
Impacto medioambiental (incluido el uso de energía y materiales en la producción, la emisión de agentes contaminantes y el reciclado)	Bajo impacto negativo

Fuente: Jelle (2011).

Teóricamente, y según el CTE (IETCC, 2010), un material aislante suele tener un bajo valor de conductividad térmica, inferior a 0,15 (W/mK). La conductividad térmica es una propiedad que describe la capacidad intrínseca de un material para conducir el calor (Asadi et al., 2018; Salim, 2022; Yang, 2004). Concretamente, representa la cantidad de calor que atraviesa un material por unidad de tiempo y unidad de área (ver [Figura 4.5](#)), por unidad de diferencia de temperatura, cuando existe un gradiente de calor constante. Tal y como aparece en la Ley de Fourier (Ec. 4.1), la velocidad del flujo o de conducción de calor por unidad de sección transversal o de área, es proporcional a la gradiente de temperatura que existe en el cuerpo, siendo esta constante de

proporcionalidad un valor dependiente de las propiedades fisicoquímicas del material que corresponde a λ (Cannon y Browder, 1984; Holman, 1999):

$$q = \frac{Q/t}{A} = -\lambda \frac{\Delta T}{e} = -\lambda \frac{(T_2 - T_1)}{e} \quad [4.1]$$

donde Q es la cantidad de calor transferido, A es el área de la sección transversal del material, T_1 y T_2 son las temperaturas de los extremos opuestos del material, e es el espesor de la superficie y t es el tiempo en segundos que tarda el calor en transferirse a través del material.

En el contexto de los materiales compuestos, la determinación de la conductividad térmica es más compleja ya que depende de las características de cada uno de los materiales constituyentes por separado (Nomura y Haji-Sheikh, 2018). También, en estos casos, la conductividad térmica puede ser influenciada por diversos factores, como la composición y orientación del refuerzo, la porosidad y la presencia de aditivos (Nomura y Haji-Sheikh, 2018). La disposición de los componentes del material compuesto puede dar lugar a una conductividad térmica efectiva distinta de las de los materiales individuales que lo componen, lo que añade una dimensión adicional a la evaluación de las propiedades térmicas de estos sistemas (Nomura y Haji-Sheikh, 2018).

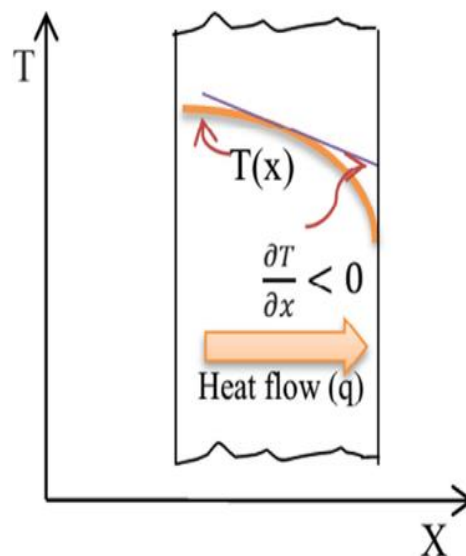


Figure 4.5. Flujo de calor a través de una superficie cuando dos medios se hayan a diferente temperatura. Fuente: Asadi et al. (2018).

La transferencia de calor mediante conducción viene, por tanto, determinada para un espesor y configuración concretos, de la conductividad térmica que posee el material de estudio (λ , definido en la Ec. 4.1, también representado a menudo con la letra k). Además, las transferencias de calor mediante convección y radiación influyen en la

velocidad del flujo de calor intercambiado entre un lado y otro de la superficie referida. El cómputo global de los tres mecanismos de transmisión de calor (conducción, convección y radiación) determina el valor del coeficiente global de transmisión de calor o transmitancia térmica, U (W/m^2K). Esta propiedad cuantifica la cantidad de energía que fluye por unidad de tiempo y superficie, transferida a través de un material o elemento constructivo (Palomo, 2017).

Los materiales aislantes deben presentar valores bajos de esta propiedad o al menos ser iguales o inferiores a los especificados en las normativas. En concreto, el documento básico HE (ahorro de energía) especifica los valores límite de la transmitancia de la envolvente térmica de un edificio según la zona climática en España (Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana del Gobierno de España, 2022). Así, por ejemplo, para Extremadura, clasificada en la zona climática C, el DB HE limita el valor de U a un máximo de $0,49 W/m^2C$. Es pertinente aclarar que, en un periodo de 10 años, el valor de U máximo para la zona C ha disminuido progresivamente desde 1,14 hasta $0,49 W/m^2K$, mostrando el creciente interés en la mejora de los elementos de la envolvente para limitar el consumo energético.

Cuando se estudia la transferencia de calor a través de la envolvente de un sistema, es frecuente encontrar varias capas de diferentes materiales dispuestas en paralelo. Cada una de estas capas tiene generalmente una función (dotar de resistencia mecánica o de propiedades aislantes, por ejemplo). En estos casos, la resistencia a la transferencia de calor global será la suma de las contribuciones de cada una de estas capas (Holman, 1999).

Según la norma UNE-EN ISO 6946:2021(2007), la transmitancia térmica U se obtiene del cálculo según la Norma ISO 10211 en el caso del método de cálculo detallado y, en el caso del método de cálculo simplificado, viene dada por:

$$U = \frac{1}{R_{tot}} \quad [4.2]$$

donde U es la transmitancia térmica, $W/(m^2 \cdot K)$ y R_{tot} es la resistencia térmica total determinada en $m^2 \cdot K/W$, incluyendo como se indicó anteriormente las contribuciones de la resistencia debida a conducción, convección y radiación.

Según se indica en la misma norma (UNE-EN-ISO, 2007), la resistencia térmica total mediante conducción, R_{tot_cond} , de un componente de la edificación plano formado por

capas térmicamente homogéneas perpendiculares al flujo de calor se calcula mediante la ecuación (4.3):

$$R_{tot_cond} = R_{si} + R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n + R_{se} \quad [4.3]$$

donde R_{si} es la resistencia térmica superficial interior, $m^2 \cdot K/W$, R_1, R_2, \dots, R_n son las resistencias térmicas de diseño de cada capa⁴, $m^2 \cdot K/W$ y R_{se} es la resistencia térmica superficial exterior en $m^2 \cdot K/W$.

Si se facilita la conductividad térmica, la resistencia térmica de la capa homogénea de 1 m^2 de superficie se obtiene a partir de la ecuación (4.4):

$$R = \frac{\lambda}{d} \quad [4.4]$$

donde R es la resistencia térmica, en $m^2 \cdot K/W$, d es el espesor de la capa del componente, en m , y λ es la conductividad térmica de diseño del producto, en $W/(mK)$.

Los materiales aislantes se suelen clasificar en varias categorías: materiales orgánicos, inorgánicos, aerogeles, nanomateriales, materiales compuestos (a base de cemento y polímeros) y aislantes térmicos a partir de residuos (Abu-Jdayil et al., 2019). De entre estas categorías, las dos familias principales son (Durakovic et al., 2020): materiales orgánicos (petroquímicos o los renovables) y materiales inorgánicos.

Los materiales orgánicos petroquímicos se consideran también tradicionales e incluyen el poliestireno expandido (EPS), el poliestireno extruido (XPS), el fenol formaldehído, el poliuretano, el poliisocianurato (PIR) y la urea formaldehído (UF) (Durakovic et al., 2020). Entre los principales inconvenientes de estos materiales se encuentran la toxicidad o las emisiones de CO_2 (Zhao et al., 2022). Los materiales orgánicos de origen vegetal o renovables se obtienen de la naturaleza y se consideran más respetuosos con el medio ambiente. Ejemplos de esta familia de materiales son la celulosa, el coco, la lana de lino, el cáñamo, el algodón reciclado, la lana de oveja y el corcho (Durakovic et al., 2020). Finalmente, se consideran materiales inorgánicos los tradicionales, como la lana de vidrio, la lana de roca, el silicato cálcico, la espuma de vidrio, la perlita o la vermiculita (Durakovic et al., 2020; Zhao et al., 2022). En la [Tabla 4.2](#) se presentan los valores de la conductividad térmica de los materiales aislantes

⁴Valor de la resistencia térmica de un material o producto de edificación en condiciones exteriores e interiores específicas que pueden considerarse típicas de las prestaciones de dicho material o producto cuando se incorpora en un componente de la edificación (UNE-EN-ISO, 2007).

térmicos comerciales más representativos, empleados en construcción según los valores recogidos en el catálogo de elementos constructivos del CTE (IETCC, 2010).

Tabla 4.2. Conductividad térmica y densidad de materiales aislantes térmicos y otros materiales empleados en construcción más representativos

Material	Conductividad térmica (W/mK)	Densidad (kg/m ³)
Corcho	0,049-0,10	<500 - >250
Espuma de poliuretano (PUR)	0,024-0,040	20-150
Lana mineral (MW)	0,031-0,05	1
Panel de vidrio celular (CG)	0,05	100-150
Poliestireno extruido (XPS)	0,029-0,039	100-220
Poliestireno expandido (EPS)	0,029-0,046	20-100

Fuente: IETCC (2010).

Los materiales aislantes pueden emplearse solos o combinados con otros materiales constructivos como el cemento, el yeso y la resina epoxi con la finalidad de disminuir la conductividad térmica del material constructivo de forma sustancial (ver [Tabla 4.3](#)), al tiempo que se mantiene la resistencia mecánica (Jelle, 2011). El incluir material aislante de origen biomásico en el material constructivo tradicional tiene el beneficio adicional de disminuir el impacto medioambiental asociado a la fabricación del segundo al ahorrar una parte importante de este. Es importante recordar que la producción de materiales de construcción como el cemento conlleva una huella importante de emisiones de CO₂ así como una significativa huella hídrica (Ferrandez-Villena et al., 2020; Jayamani et al., 2014, 2014; Philip y Rakendu, 2020; Pisello et al., 2016; Singh et al., 2022).

Tabla 4.3. Conductividad térmica de algunos materiales más representativos empleados en construcción.

Material	Conductividad térmica (W/mK)	Densidad (kg/m ³)
Cemento	0,30-1,80	<500 - >2000
Resina Epoxi	0,20	1200
Yeso	0,18-0,56	<600 - >1500

Fuente: IETCC (2010).

4.2.2. MÉTODO DEL ESTADO TRANSITORIO

Existen diversas técnicas para determinar la conductividad térmica los materiales. Entre ellas destacan las técnicas basadas en el método de estado estacionario y las basadas en el método de estado transitorio (Palacios et al., 2019).

En las mediciones en estado estacionario, la conductividad térmica se determina midiendo la diferencia de temperatura (ΔT) bajo un flujo de calor (Q) en estado estacionario a través de una muestra (espesor) (Palacios et al., 2019). La conductividad térmica viene dada entonces por la pendiente de la potencia frente al gradiente de temperatura entre ambos lados de la muestra (Yang, 2004). Todos los métodos de estado estacionario se basan directamente en la ley Fourier (Ec.4.1). Estos métodos miden directamente la conductividad térmica y son adecuados para materiales de baja conductividad térmica y materiales compuestos. Sin embargo, las técnicas de estado estacionario requieren muestras relativamente grandes y ensayos de mayor duración que los métodos transitorios (Palacios et al., 2019). Los métodos de estado estacionario tienen la ventaja de que el flujo de calor es unidireccional en un área mayor, lo que permite medir muestras con conductividad térmica anisotrópica y materiales compuestos en los que es necesario medir áreas mayores (Palacios et al., 2019).

En las mediciones en estado transitorio, las fuentes de calor utilizadas se suministran periódicamente o como un pulso, lo que da lugar a cambios de temperatura periódicos (salida de señal de fase) o transitorios (salida de señal de amplitud) en la muestra, respectivamente (Zhao et al., 2016). Estos métodos determinan la difusividad térmica (α) a través de un flujo térmico transitorio durante el proceso de calentamiento (Palacios et al., 2019). La difusividad térmica mide la tasa de transferencia de calor a través del material, el valor de la difusividad térmica está relacionado con la densidad y la capacidad calorífica específica mediante la ecuación (Ec. 4.5):

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho C_p} \quad [4.5]$$

donde λ es la conductividad térmica, α es la difusividad térmica, C_p es la capacidad calorífica específica y ρ es la densidad real.

Los métodos de condiciones transitorias tienen una corta duración (unos minutos), lo que reduce las posibilidades de que se desarrolle convección en los fluidos (Harris et al., 2014). Otra ventaja es que la difusividad térmica se mide en paralelo a la conductividad térmica (Harris et al., 2014). También utiliza pequeñas cantidades de muestra y puede trabajar a alta temperatura y presión (Harris et al., 2014). Sin embargo, las precisiones son inferiores a las de los métodos de estado estacionario (Palacios et al., 2019). Para obtener los valores de conductividad térmica, es necesario conocer/medir la capacidad calorífica específica y la densidad de las muestras estudiadas (Li et al., 2014) lo que puede aumentar el error de la medición (Palacios et al., 2019).

4.3. MATERIALES Y MÉTODOS

En este apartado se describen los materiales y métodos experimentales empleados en el presente capítulo. En primer lugar, se describen las muestras consideradas en este estudio, indicando su nombre y características principales. Seguidamente se detalla el método empleado en la caracterización térmica de estas muestras.

4.3.1. MATERIALES

Los materiales estudiados en esta sección fueron, por un lado, aquellos preparados sólo con WHS bajo diferentes condiciones de: tamaño de partícula de WHS, grado de compactación, o adición de un ligante extra. La nomenclatura general utilizada para estas muestras ha sido WHS-X-100-M-Y, siendo X el tamaño de partícula (tp) de WHS utilizado (A: $tp < 0,5$ mm; B: $0,5 < tp < 1$ mm; o C: $1 < tp < 2$ mm), M el material ligante empleado (sin etiqueta: no lleva ligante, ALMIDÓN: almidón de maíz, COLA: cola blanca), y, por último, Y es la carga aplicada durante la compactación de la muestra (sin etiqueta: compactación manual, 1T: compactación controlada a 1 t, o 2T: compactación controlada a 2 t). El número 100 hace referencia a que se ha empleado solo WHS sin ningún tipo de aglutinante o material extra. Por ejemplo, la muestra WHS-A-100 sería una muestra preparada con partículas de WHS con un tamaño inferior a 0,5 mm, compactada manualmente. Y la WHS-B-100-COLA sería una muestra preparada mezclando WHS de tamaño promedio entre 0,5 y 1 mm con cola blanca disuelta en agua y empleando compactación manual.

Por otro lado, se han estudiado las propiedades térmicas de materiales compuestos de yeso y WHS. En el Capítulo 3 de la presente tesis doctoral se recoge todo el proceso de acondicionamiento del material de partida, así como el proceso de preparación de las muestras. En este capítulo, se ha analizado la influencia en las propiedades térmicas de los materiales preparados de las condiciones experimentales: tamaño de partícula de WHS, la cantidad de WHS en la muestra y el grado de compactación. La nomenclatura general utilizada para estas muestras ha sido WHS-X-C-Y, siendo X el tamaño de partícula (tp) de WHS utilizado (A: $tp < 0,5$ mm; B: $0,5 < tp < 1$ mm; o C: $1 < tp < 2$ mm), C la cantidad de WHS en la muestra (1 para una proporción en peso WHS:yeso de 1:99, 5 para 1:19, 10 para 1:9, 20 para 1:4, 30 para 3:7 o 50 para 1:1), y, finalmente, Y la carga aplicada durante la compactación de la muestra (sin etiqueta: compactación manual; 1T: compactación controlada a 1 t; y 2t: compactación controlada a 2 t). Por ejemplo, la muestra WHS-B-50-1T sería una muestra preparada con un tamaño

de WHS comprendido entre 0,5 a 1 mm, una proporción en peso WHS:yeso de 1:1 mediante una compactación en prensa hidráulica a una 1 t.

Por último, se han considerado varias muestras a base de WHS con un tamaño de partícula de 0,5 a 1 mm combinado con otros materiales constructivos (cemento y resina epoxi), compactadas todas ellas de forma manual. La nomenclatura elegida para los materiales combinados de WHS con cemento y resina epoxi es: WHS-B-C-M, siendo C la cantidad de WHS en la muestra con respecto al material con el que se mezcla (10 para 1:9 o 50 para 1:1) y M es el material (CEMENTO o RESINA). La letra B hace referencia al tamaño de partícula empleado, que en este caso también es de 0,5 a 1 mm en todas las muestras. Por ejemplo, la muestra WHS-B-50-CEMENTO sería una muestra preparada con WHS de tamaño promedio entre 0,5 y 1 mm y cemento en una proporción WHS: cemento de 1:1 mediante compactación manual.

En la [Tabla 4.4](#) se resumen las características y nomenclaturas de las muestras que se han caracterizado térmicamente en el presente capítulo.

Tabla 4.4. Nomenclatura y condiciones de preparación de las muestras.

Muestra	Tamaño de partícula (mm)	Proporción WHS:aglutinante (% en peso)	Compactación del material (t)	
G	0,1-1	0:1	Manual	
WHS-A-100	< 0,5		Manual	
WHS-A-100-1T			1	
WHS-A-100-2T			2	
WHS-B-100	0,5 - 1	1:0	Manual	
WHS-B-100-1T			1	
WHS-B-100-2T			2	
WHS-B-100-COLA			Manual	
WHS-B-100-ALMIDÓN			Manual	
WHS-C-100	1-2		Manual	
WHS-C-100-1T			1	
WHS-C-100-2T			2	
WHS-A-1	< 0,5	1:99	Manual	
WHS-A-5		1:19		
WHS-A-10		1:9		
WHS-A-20		1:4		
WHS-A-30		3:7		
WHS-A-50		1:1		
WHS-B-1		0,5 - 1		1:99
WHS-B-5	1:19			
WHS-B-10	1:9			
WHS-B-20	1:4			
WHS-B-30	3:7			
WHS-B-30-1T	3:7			
WHS-B-30-2T	3:7			
WHS-B-50	1:1			
			1	
			2	

WHS-B-50-1T		1:1	1
WHS-B-50-2T		1:1	2
WHS-B-50-CEMENTO		1:1	Manual
WHS-B-10-CEMENTO		1:9	
WHS-B-10-RESINA		1:9	
WHS-C-1	1-2	1:99	
WHS-C-5		1:19	
WHS-C-10		1:9	
WHS-C-20		1:4	
WHS-C-30		3:7	
WHS-C-50		1:1	

4.3.2. TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN

En este trabajo la conductividad térmica (λ , W/mK) ha sido determinada mediante, un analizador C-Therm TCi de la casa *Mathis Instrumentos Ltd.*, que emplea la técnica de la fuente plana transitoria modificada (MTPS) (ASTM D7984-16, 2021) y utiliza un sensor de reflectancia térmica unilateral e interfacial que aplica una fuente de calor constante a la muestra (área circular de 17 mm de diámetro) durante breves periodos de tiempo. Con este método, se pueden analizar las propiedades térmicas de sólidos, fluidos y polvos utilizando un mismo sensor (Harris et al., 2014). El sistema de medición se compone de un sensor ([Figura 4.6](#) derecha), un sistema electrónico de control y un programa informático ([Figura 4.6](#) izquierda).



Figura 4.6. Analizador de conductividad térmica TCi (izquierda) y sensor de reflectancia térmica (derecha). Fuente: Venkataraman y Militky (2014).

Las muestras fueron analizadas en los Servicios Técnicos de Investigación pertenecientes a la Unidad de Análisis Térmico y Caracterización Textural de Sólidos de la Universidad de Alicante. El proceso de medida consiste en colocar el sensor de reflectancia térmica a un solo lado de la muestra, siendo el propio sensor el soporte de

esta (ver [Figura 4.6](#) derecha). Previamente se aplica el agente de contacto a la muestra, en este caso una grasa térmica conductora (*Wakefield 120*). Además, para asegurar el mejor contacto posible de la muestra con el sensor, se coloca una pesa de 500 g en la parte superior de la muestra. El sensor aplica la fuente de calor y comienza la medición.

El método de medida consiste en aplicar una corriente conocida al elemento calefactor del sensor proporcionando una pequeña cantidad de calor, concretamente un pulso con las siguientes características: tiempo de prueba = 1 s, tiempo de comienzo del cálculo = 0,5 s, tiempo de enfriamiento = 60 s, frecuencia = 100 Hz, nivel de potencia = 37 mA. El calor producido da como resultado un incremento de la temperatura en la interfase entre el sensor y la muestra (típicamente menos de 2 °C), por lo que este incremento de temperatura induce a un cambio en la caída del voltaje del elemento sensor. De esta forma, el incremento en el voltaje del sensor guarda una relación inversamente proporcional con el flujo de calor que pasa a través de la muestra, es decir, con su conductividad térmica. Como patrón de referencia para comprobar que el equipo está midiendo correctamente se ha empleado una pieza de PYREX con el mismo agente de contacto (*Wakefield 120*) y la misma pesa de 500 g.

4.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.4.1. MUESTRAS PREPARADAS ÚNICAMENTE CON WHS

En esta sección se analizan los resultados obtenidos al medir las propiedades térmicas de las muestras preparadas solo con WHS. Se estudiará la influencia sobre estas propiedades del tamaño de partícula de WHS, el grado de compactación durante la preparación de las muestras y la presencia de un ligante adicional encargado de afianzar la unión entre las partículas.

4.4.1.1. Estudio de la Influencia del tamaño de partícula del WHS y el grado de compactación

En este apartado se analiza la influencia del tamaño de partícula [$< 0,5$ mm (A), de 0,5 a 1 mm (B), y de 1 a 2 mm (C)] en las propiedades térmicas del material obtenido empleando diferentes grados de compactación (M, 1 t y 2 t).

Para analizar las propiedades térmicas del material se deben tener en cuenta otras propiedades como la densidad y la porosidad de las muestras debido a que ejercen una influencia directa sobre los resultados (ver Capítulo 3). En la [Figura 4.7](#) se comparan los

valores de la densidad de las muestras preparadas con diferentes tamaños de partícula (A, B y C) y diferentes grados de compactación durante el moldeo. Según los resultados, los valores promedio de densidad variaron de 0,241 a 0,749 g/cm³. No se observa una relación clara entre el tamaño de partícula y la densidad de las muestras en todos los casos. Por ejemplo, en el caso del prensado manual, las muestras preparadas con partículas de WHS tamaño inferior y superior presentaron una densidad similar y claramente superior a la preparada con partículas de WHS entre 0,5 y 1 mm (B). Diferente tendencia se observa para aquellas prensadas con carga controlada. En el caso de las muestras preparadas a 1 t, la densidad aumenta significativamente con el tamaño de partícula, y se observa el efecto contrario para el caso de las muestras preparadas a 2 t. Sin embargo, sí es claro el aumento de la densidad para todos los tamaños de partícula a medida que se incrementa el grado de compactación durante la preparación de las muestras. Por ejemplo, para el caso de la serie C (los tamaños de partículas más grandes), se obtienen valores desde los 0,33 g/m³ hasta los 0,61 g/cm³, mientras que para las muestras con tamaño de partícula más pequeños se incrementa la densidad desde 0,33 g/m³ hasta los 0,75 g/cm³.

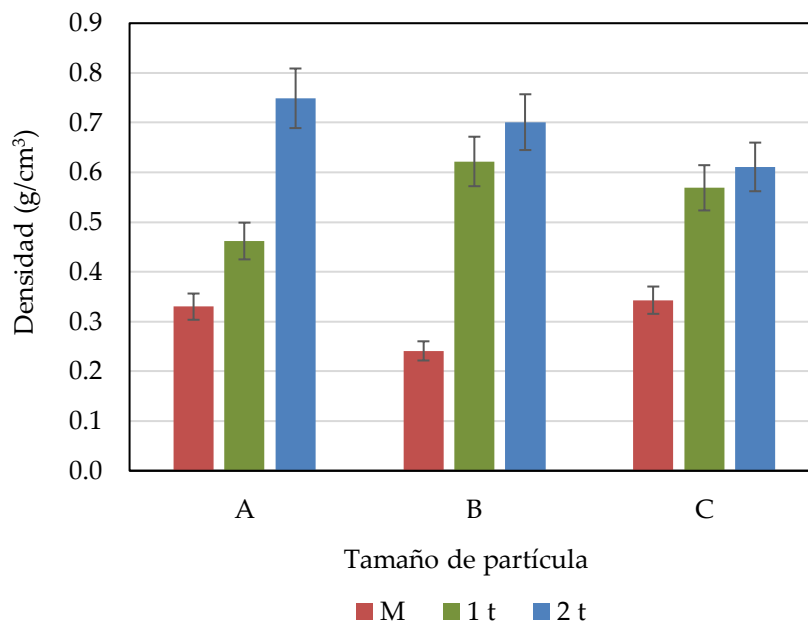


Figura 4.7. Gráficos de barras que representan la densidad (ρ , g/cm³) de los materiales a base de WHS preparados a diferentes niveles de compactación y tamaños de partículas de WHS.

La [Figura 4.8](#) representa el coeficiente de conductividad térmica de las muestras preparadas. Como se desprende de la figura, los valores promedio de conductividad térmica oscilaron entre 0,156 y 0,300 W/mK; valores similares a los reportados por Ferrández-García et al. (2020) para tableros de partículas fabricados a partir de la poda

de palmeras. Podría esperarse que al aumentar el grado de compactación durante la preparación de las muestras se incremente el valor de la conductividad térmica (Nguyen et al., 2018; Nguyen et al., 2010) ya que la cantidad de aire interparticular, que actuaría como aislante, es menor. Sin embargo, esta tendencia no se observa en ninguna de las tres series de muestras. Esta desviación de lo esperado podría explicarse en base a la probable diferencia en el contenido de humedad presente en las muestras en el momento de la medida de la conductividad eléctrica. A pesar del secado exhaustivo de todas las muestras después de su preparación, es concebible que las muestras hayan podido retener más agua (Salas-Ruiz y Barbero-Barrera, 2019) y de forma diferente del entorno antes del análisis térmico. Las muestras prensadas de forma manual y a 2 t alcanzaron el valor más alto de la conductividad con el mayor tamaño de partícula, lo que corroboraría un mayor contenido en agua. Las muestras prensadas a 1 t, por el contrario, mostraron superiores valores de conductividad con las partículas más pequeñas. La absorción de humedad parece haber sido la contraria. La muestra con un tamaño de partícula de 0.5 a 1 mm (WHS-B-100-1T) y compactada a 1 t, que presenta la menor densidad y la mayor porosidad (ver Capítulo 3), ha sido la que ha presentado menor valor de conductividad térmica.

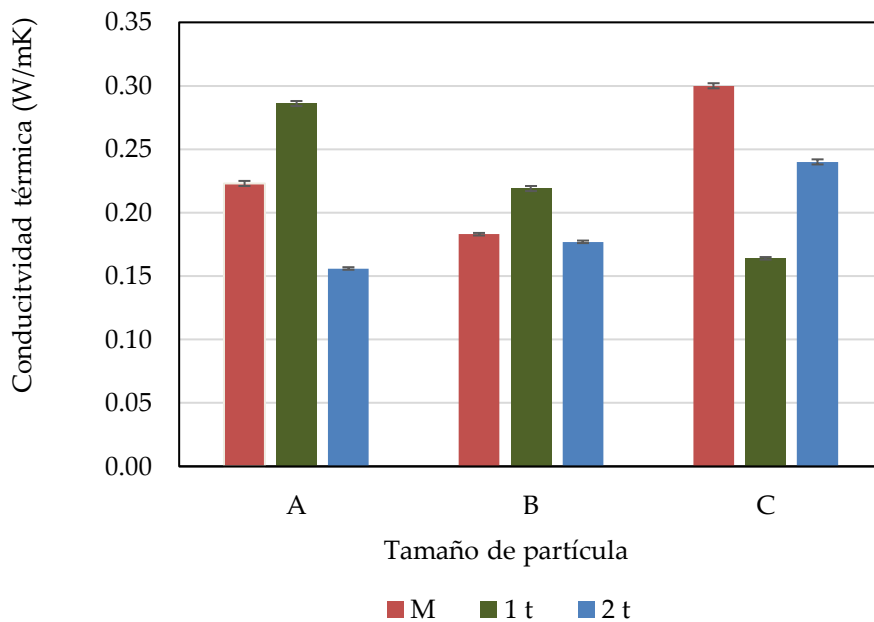


Figura 4.8. Gráfico de barras que representan el coeficiente de conductividad térmica de los materiales a base de WHS preparados a diferentes niveles de compactación y tamaños de partículas de WHS.

En la [Tabla 4.5](#) se comparan los valores de la conductividad térmica obtenidos en este trabajo con los reportados en otros estudios previos para otras biomasas y el jacinto

de agua. Los valores obtenidos en nuestro caso son superiores a los indicados por la mayoría de los investigadores y similares a los obtenidos para los materiales a base de corteza de madera (Christy et al., 2021). La discrepancia en los valores puede ser el resultado de varios factores, que incluyen las variaciones en la preparación de las muestras, las diferencias en los métodos utilizados para medir la conductividad térmica y las condiciones ambientales consideradas durante la determinación.

Tabla 4.5. Valores de conductividad térmica obtenidos para biomásas en la investigación previa.

Biomasa	Tamaño de partícula (mm)	Conductividad térmica (W/mK)	Referencia
Bagazo	8-40	0,049-0,055	Panyakaew y Fotios (2011)
Cáscara de coco	8-10	0,046-0,068	
Corteza de madera	10-40	0,110-0,140	Christy et al. (2021)
Fibras de corteza de abeto	1,6-7	0,0475-0,064	Gößwald et al. (2021)
Jacinto de agua	Cualquier tamaño (dividido en 2 grupos: inferiores e iguales o superiores a 2 mm)	0,047-0,065	Salas-Ruiz et al. (2019)
Jacinto de agua	< 0,5	0,223	Presente estudio
	0,5-1	0,183	
	1-2	0,300	
Jacinto de agua y cáñamo	60-90	0,023	Bhuvaneshwari y Sangeetha (2017a)
		0,088	
		0,047	
Jacinto de agua y cemento	< 2,36	0,076	Philip y Rakendu (2020)
Jacinto de agua + latex de caucho natural	20-30	0,025-0,030	Jaktorn y Jiajitsawat (2014)
Kenaf	~50	0,040-0,065	Xu et al. (2004)
Tallo de algodón	25x10x5	0,058-0,081	Zhou et al. (2010)

4.4.1.2. Estudio de la Influencia de la adición de ligantes en el material

En este apartado analiza la influencia de la adición de dos ligantes distintos (almidón de maíz y cola blanca) al material preparado con partículas de WHS con un tamaño de partícula entre 0,5 y 1 mm (B) mediante compactación manual. Con el fin de comparar los resultados, también se tienen en cuenta las muestras preparadas íntegramente con WHS.

La [Figura 4.9](#) resume los valores de conductividad térmica de las muestras WHS-B-100, WHS-B-100-COLA y WHS-B-100-ALMIDÓN. La muestra WHS-B-100, que no tiene ningún tipo de ligante entre las partículas, ha sido la que ha mostrado una menor conductividad térmica (0,183 W/mK), mientras que las muestras WHS-B-COLA y WHS-

B-ALMIDÓN presentan una conductividad ligeramente superior (0,284 y 0,289 W/mK, respectivamente). La razón de esta diferencia podría encontrarse en que el ligante reduzca en cierta medida la porosidad de las muestras, dado que existe mayor adherencia entre ellas, limitando la cantidad de aire que pueda quedar ocluida dentro del material, así como entre las partículas. El hecho de que, con ambos ligantes, que son de muy diversa naturaleza, se obtenga similar conductividad térmica, nos sugiere que la cantidad de ligante utilizada podría ser más significativa que el tipo o variedad de ligante. Ali et al. (2021), que estudiaron el uso de almidón de maíz y cola de madera en la preparación de materiales híbridos a base de hojas de palmera datilera y fibras de trigo, también observaron valores mayores de conductividad para materiales híbridos.

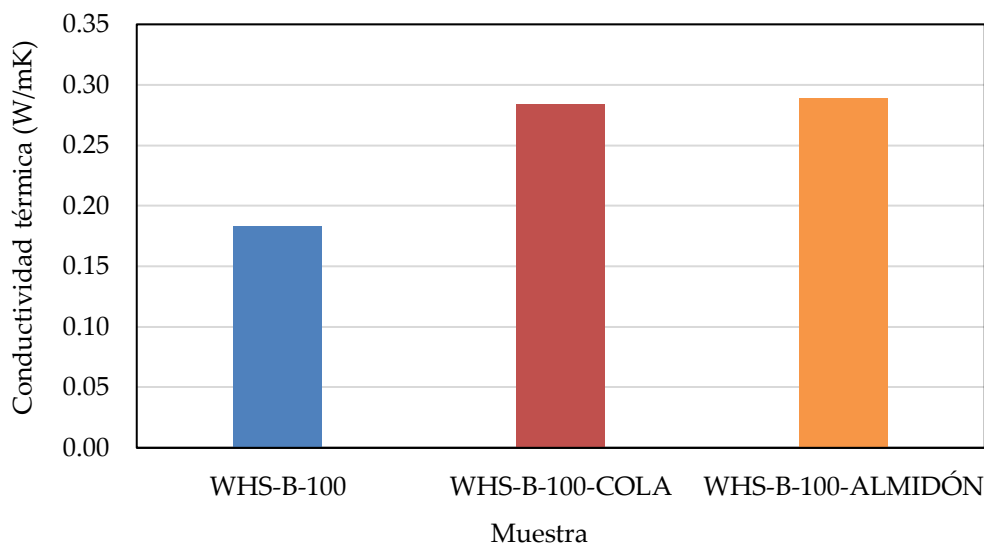


Figura 4.9. Diagrama de barras de la conductividad térmica de las muestras preparadas íntegramente con WHS y con otros ligantes (cola blanca y almidón de maíz).

4.4.2. MUESTRAS A BASE DE YESO

Este apartado se centra en la discusión de los resultados obtenidos de la caracterización térmica de las muestras preparadas a base de WHS mezclado con yeso en distintas proporciones y en su comparación con una muestra de control fabricada solo con yeso. Para ello se analizan diferentes factores: cantidad de WHS en las muestras, tamaño de partícula del WHS y grado de compactación de la muestra. La muestra de control fue preparada bajo las mismas condiciones que las muestras obtenidas mezclando yeso con las partículas de WHS, con el fin de comparar los resultados obtenidos y analizar el impacto que conlleva la adición de biomasa al yeso en cuanto a propiedades térmicas. El valor de la conductividad térmica obtenido para la muestra de control (G), fabricada únicamente con yeso, ha sido de 0,583 W/mK.

4.4.2.1. Estudio de la influencia de la cantidad de WHS y el tamaño de partícula

En el presente apartado se analiza la influencia en las propiedades térmicas de los materiales preparados con yeso (G) y tallo de jacinto de agua (WHS) de las diferentes proporciones (1:99-1:1) y diferentes tamaños de partícula de WHS [A ($< 0,5$ mm), B ($0,5 < t_p < 1$ mm) y C ($1 < t_p < 2$ mm)] indicados en la sección 4.3.1 del presente capítulo.

En la [Figura 4.10](#) se comparan los valores de conductividad térmica y la densidad para las tres series de muestras preparadas mediante moldeo y compactación manual variando la cantidad de WHS en la muestra. Como era de esperar atendiendo a otros estudios (Liuzzi et al., 2018), se observa que la densidad de las muestras disminuye linealmente al incrementar el contenido de partículas de WHS. La ecuación lineal (ordenada en el origen, a , y pendiente, b) que proporciona el ajuste de los datos de la densidad con respecto a la cantidad de WHS en el material es bastante similar en todos los casos con valores medios de $a = -0,0123$ y $b = 1,0564$ y con correlaciones superiores al 92%. Por otro lado, se observa que en todas las series la conductividad térmica de las muestras también disminuye conforme aumenta la cantidad de partículas de WHS en el material híbrido. No obstante, la variación no sigue una tendencia lineal, ya que a partir del 30 wt.% de WHS, la disminución de la conductividad térmica se reduce o se mantiene en valores relativamente constantes, y esto se hace más evidente para mayores tamaños de partícula (serie C), para los que contenidos del 50 wt.% de WHS implican que la conductividad aumente. Se puede decir entonces que, aunque la densidad para esta muestra es la menor, otros factores como la posible absorción diferencial de humedad en las partículas de WHS, están influyendo en la medida de la conductividad de la muestra. Otro factor a considerar es el efecto que el cribado de tamaño pueda hacer tenido en la composición de la muestra.

Para evidenciar mejor este efecto, en la [Figura 4.11](#) se muestra la variación de la conductividad térmica con la densidad para la serie WHS-C-X-M. La conductividad alcanza un mínimo a valores cercanos a los $0,77$ g/cm³ y después aumenta. Similares comportamientos han sido publicados por Anh et al. (2021) para la fibra de palma y Gnip et al. (2012) para placas de poliestireno expandido. Estos últimos sugieren que el tamaño de las burbujas de aire internas, la complejidad de la estructura del material, y la densidad de partículas sólidas podrían ser los responsables del comportamiento observado. Además, la disminución no lineal observada para la conductividad podría estar relacionada con la reducción de la capacidad de la superficie del material de absorber vapor de agua ambiental causada por la disminución en la cantidad de espacios o huecos al aumentar de la densidad de la muestra (Hung Anh y Pásztor, 2021).

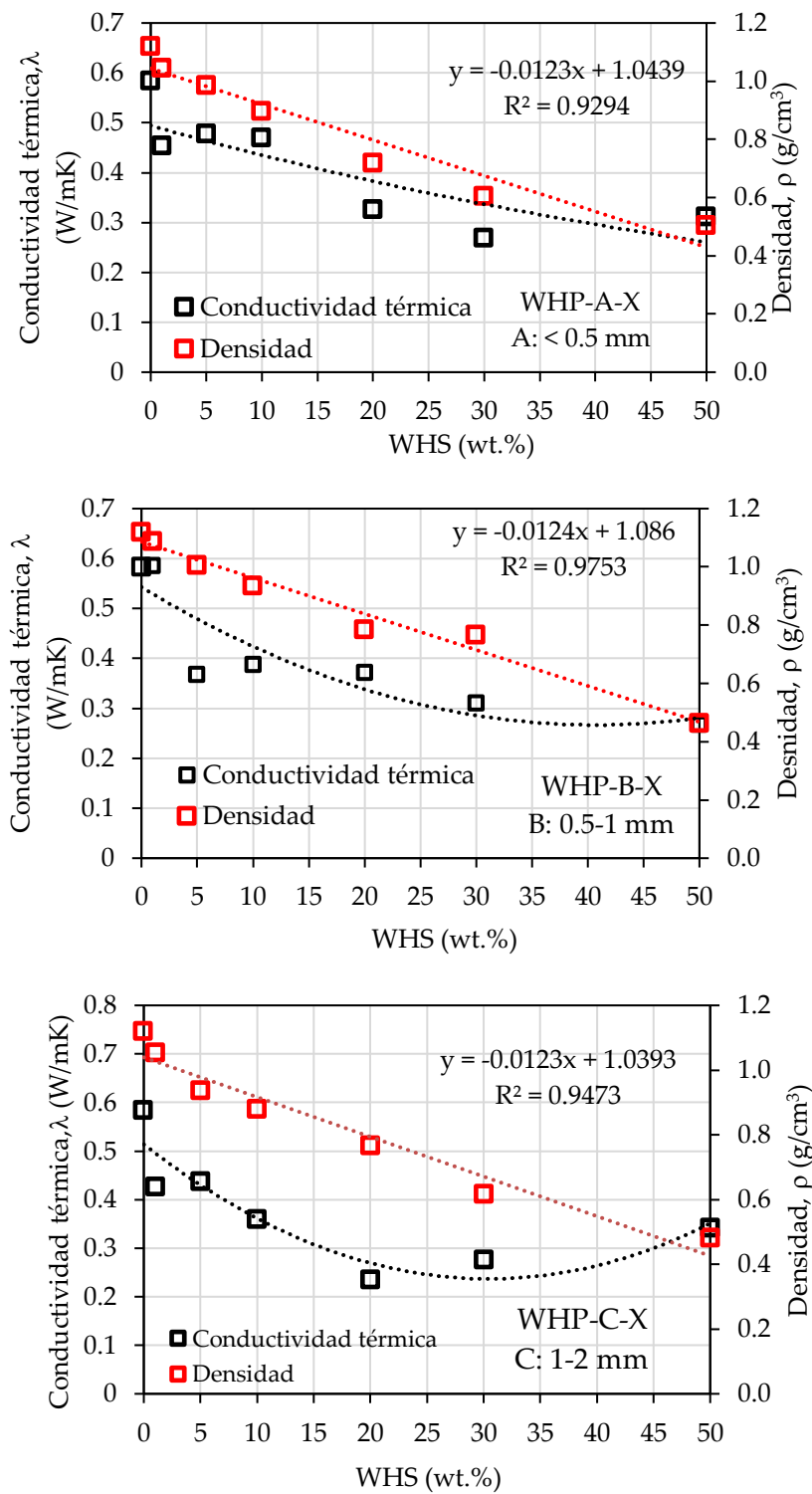


Figura 4.10. Densidad y conductividad térmica de las muestras preparadas para las series de muestras WHS-A-X, WHS-B-X y WHS-C-X.

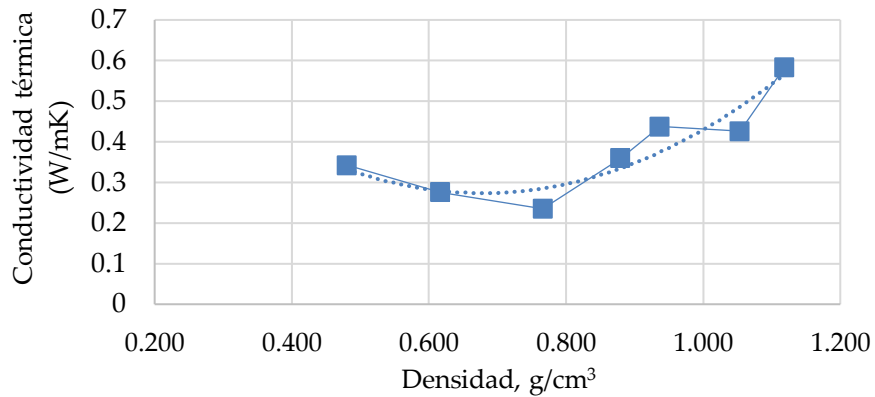


Figura 4.11. Efecto de la densidad en la conductividad térmica (serie WHS-C-X)

La muestra preparada con tan solo un 1 wt.% en peso de WHS y con un tamaño de partícula entre 0,5-1 mm (denominada WHS-B-50) es la que ha mostrado un valor de conductividad térmica mayor (0,587 W/mK), muy similar al valor mostrado por la muestra preparada solo con yeso (G= 0,583 W/mK). La muestra que ha mostrado un valor de conductividad térmica más bajo (0,235 W/mK) ha sido la preparada con un 20% de WHS y con un tamaño de partícula entre 1 y 2 mm (WHS-C-20).

La [Figura 4.12](#) representa la máxima reducción en la conductividad térmica observada en cada serie con respecto al yeso fraguado (G). La máxima reducción de la conductividad (60%) se ha obtenido en la muestra preparada con un tamaño de partícula superior a 1 mm y con una proporción WHS:G de 20:80. Esto está en línea con lo comentado anteriormente: la máxima disminución de la conductividad utilizando tamaños de partícula de WHS superiores a 1 mm se obtiene con menores cantidades de WHS en la muestra (20 wt.%), pues a partir de esta cantidad la conductividad térmica aumenta. La reducción en este caso es superior a la observada en las series con menor tamaño de partícula y mayor cantidad de WHS en el material híbrido.

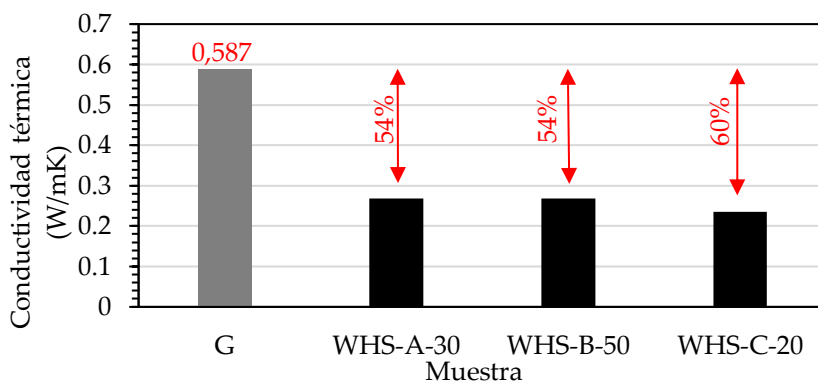


Figura 4.12. Conductividad térmica de las muestras preparadas con distintas cantidades y tamaños de partícula de WHS

4.4.2.2. Estudio del efecto de la carga aplicada durante la preparación de las muestras

En esta sección se analiza la influencia de la carga aplicada durante la preparación de las muestras preparadas con dos proporciones distintas de WHS:G (3:7 y 1:1), sobre el valor de conductividad térmica de muestras compuestas, empleando un tamaño de partícula B (0,5-1 mm). Las cargas empleadas para su fabricación han sido: carga manual (M) y carga mediante prensa hidráulica a 1 t y 2 t.

La [Figura 4.13](#) muestra los valores de conductividad térmica obtenidos para las muestras preparadas. Se puede observar cómo la carga aplicada ha afectado a los valores de conductividad, de manera bastante similar al caso de las muestras preparadas solo con WHS. Se puede observar también cómo las muestras preparadas mediante compactación manual presentan los valores más bajos de conductividad térmica, mientras que las muestras compactadas con prensa hidráulica y carga controlada presentan valores mayores. Aunque en este tipo de materiales basados en yeso, los tiempos de fraguado tienen más importancia en la solidificación de la muestra, los resultados revelan que un aumento de la presión de conformado durante el fraguado influye significativamente en la conductividad térmica disminuyendo su valor. Respecto a las muestras obtenidas mediante aplicación de carga manual, para el tamaño de partícula y proporción estudiadas, presenta valores similares a los correspondientes a 2 t. Este resultado se podría enlazar con la discusión anterior en donde se mencionaba que la carga manual daba lugar a resultados diferentes dependiendo del tamaño de partícula de WHS utilizado. Esto es un hallazgo interesante en la tesis, y que aporta a la comunidad científica la demostración de la influencia del tamaño de partícula en el propio análisis.

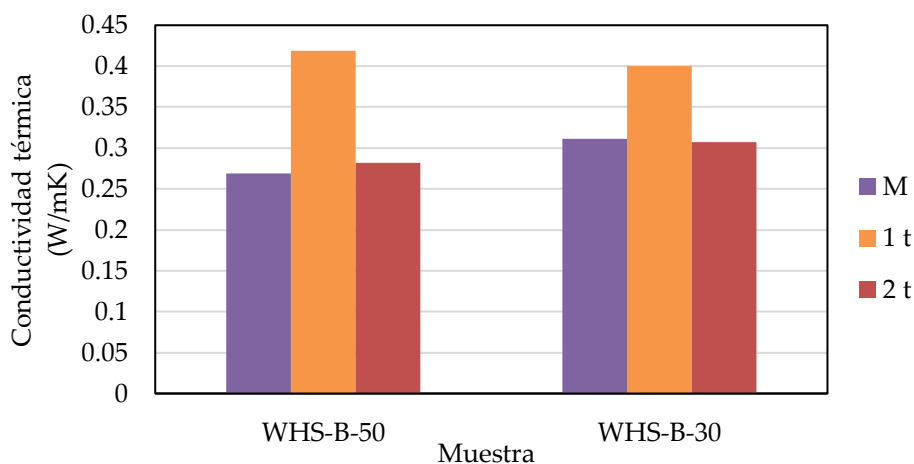


Figura 4.13. Conductividad térmica de las muestras preparadas con un tamaño de partícula B y unas proporciones de 1:1 y 3:7, empleando diferentes cargas en la fabricación de la muestra.

4.4.3. MUESTRAS A BASE DE OTROS MATERIALES CONSTRUCTIVOS

En este apartado se analizan los resultados obtenidos en la caracterización térmica de las muestras preparadas a base de WHS con un tamaño de partícula entre 0,5 mm y 1 mm (B) con la incorporación de otros materiales constructivos (cemento y resina epoxi). Con el fin de comparar los resultados, también se han incluido las muestras preparadas con yeso en la misma proporción.

En la [Figura 4.14](#) se comparan los resultados de conductividad térmica obtenidos por las muestras WHS-B-10, WHS-B-10-CEMENTO y WHS-B-10-RESINA. Se puede comprobar cómo el material utilizado como matriz para la fabricación del compuesto ha influido en las propiedades térmicas del material obtenido. La muestra WHS-B-10-RESINA es la que presenta un valor menor de conductividad térmica (0,291 W/mK), seguida de la muestra a base de yeso WHS-B-10 (0,389 W/mK), mientras que la muestra WHS-B-10-CEMENTO es la que presenta un valor de conductividad térmica más elevado (0,513 W/mK). Por tanto, se puede comprobar que, aunque la resina es un material poco poroso, puede presentar una buena capacidad de aislamiento térmico.

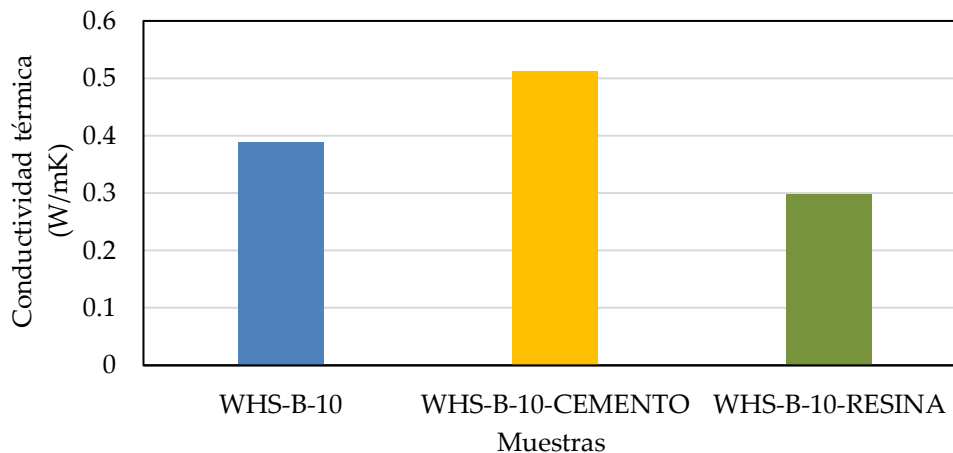


Figura 4.14. Conductividad térmica de las muestras preparadas con un tamaño de partícula B y otros materiales constructivos en una proporción WHS:G de 1:9.

Por otro lado, los resultados indican que el material preparado con cemento como aglutinante (WHS-B-50-CEMENTO) ha presenta un valor de conductividad térmica (0,509 W/mK) que casi duplica al valor mostrado por la muestra que emplea yeso como matriz (0,269 W/mK), denotada como WHS-B-50.

En la [Tabla 4.6](#) se comparan los valores obtenidos en este estudio con aquellos reportados en otros artículos.

Tabla 4.6. Valores de conductividad térmica de los materiales basados en jacinto de agua.

Material	Tamaño de partícula (mm)	Densidad (Kg/m ³)	Conductividad térmica (W/mK)	Referencia
Jacinto de agua + cemento	< 2	314–620	0,045-0,067	Salas-Ruiz y Barbero (2019)
	> 2	244–495	0,062-0,087	
	< 2,36	470	0,0765	Philip y Rakendu (2020)
	0,5-1	509-997	0,374-0,513	Presente estudio
Jacinto de agua + resina epoxi	< 0,841	927-984	0,569	Scruti et al. (2021)
	0,5-1	1016	0,299	Presente estudio
Jacinto de agua + arroz + resina epoxi	< 2,36	278-419	0,058-0,070	David et al. (2022)
Jacinto de agua + mazorca + resina epoxi	< 0,841	927-984	0,364-0,621	Scruti et al. (2021)
Jacinto de agua + ceniza de mazorca + resina epoxi	< 0,841	927-984	0,305-0,615	Scruti et al. (2021)
Jacinto de agua + yeso	20-25	N/E	0,150-0,200	Hankhuntutod et al. (2022)
	< 2	443-1089	0,235-0,587	Presente estudio

Solo se ha encontrado un trabajo en donde se mezcle el jacinto de agua y el yeso (Hankhuntutod et al., 2022). En nuestro caso los valores de la conductividad térmica de las muestras son algo superiores que los indicados en ese estudio. Sin embargo, los valores no deberían ser comparables dada la gran diferencia que existe entre las partículas del WH utilizadas en la preparación de las muestras, además de que en dicho estudio no se especifica la densidad de las muestras. Por otro lado, hay varios trabajos que usan como aglutinante el cemento. Por ejemplo, Salas-Ruiz y Barbero-Barrera (2019) y Philip y Rakendu (2020) reportaron valores de conductividad térmica inferiores a 0,1 W/mK, que son significativamente inferiores al valor determinado en esta investigación (0,374 W/mK). Esta discrepancia puede indicar que las diferentes en la preparación de las muestras, las técnicas de determinación de la conductividad térmica y el tipo de cemento empleado derivaron en densidades superiores a las indicadas por estos autores. Así mismo, en nuestro caso no se controló la cantidad de humedad en las muestras. Por último, si comparamos los resultados de esta investigación con los de Scruti et al. (2021), quienes mezclan el WHS con resina epoxi, se conductividades térmicas significativamente más bajas que las indicadas en ese estudio.

4.5. SIMULACIÓN DE EFICIENCIA ENERGÉTICA

En base a los resultados obtenidos, el WH no podría utilizarse íntegramente como material aislante en la construcción. Por un lado, presenta valores de conductividad térmica superiores a $0,15 \text{ W/mK}$, que es el máximo valor indicado para esta propiedad en el CTE (IETCC, 2010) para materiales aislantes convencionales. Además, tampoco puede sustituir íntegramente al yeso empleado en la construcción como, por ejemplo, en formato de placa, puesto que las propiedades no son las mismas, principalmente la resistencia mecánica (ver Capítulo 3, apartado 3.4.2.6). Sin embargo, en el presente apartado se realiza un estudio de simulación en el que se calcula la calificación energética, así como la resistencia térmica total en un estudio de caso de una vivienda unifamiliar, con el fin de comprobar la aplicabilidad del WH en el sector de la construcción. Y, si bien, no es posible la sustitución del material aislante ni otro material constructivo empleado en la construcción dadas las características del WHS analizadas en el presente trabajo, quizás si se pueda combinar con estos materiales para que sea factible su aplicación.

Para llevar a cabo la simulación primero se seleccionan los materiales de entre todos los analizados en el presente capítulo que ofrecen las mejores propiedades térmicas. Por un lado, se selecciona uno de los materiales compuestos fabricados que emplea el yeso como aglutinante. De entre los materiales compuestos a base de yeso y WH con menor conductividad térmica para todas las variables, se selecciona la muestra WHS-B-50, dado que fue la que presentó un coeficiente de conductividad menor ($0,269 \text{ W/mK}$) y emplea una menor cantidad de yeso con el fin de reducir la cantidad de yeso empleada en construcción. En cuanto a los materiales preparados únicamente con WHS, de todas las muestras estudiadas, la WHS-B-100 fue la que presentó un coeficiente de conductividad térmica de entre los más bajos ($0,183 \text{ W/mK}$), así como un buen rendimiento acústico. Como se ha especificado en el Capítulo 3 de esta tesis doctoral (sección 3.6), para realizar la simulación se ha empleado el programa *Cypetherm HE Plus* y se ha considerado una supuesta vivienda con una superficie total de $188,21 \text{ m}^2$. Empleando los datos de conductividad térmica para cada una de las capas, y usando un espesor definido previamente para los cerramientos de una vivienda unifamiliar, el *software* realiza el cálculo de la resistencia térmica total para cada una de las capas. A partir de ella se determina el coeficiente global de transferencia de calor, U , del muro el cual debe ser como máximo $0,49 \text{ W/m}^2\text{K}$ para exteriores de acuerdo con el CTE (IETCC, 2010). Este valor se tiene en cuenta como referencia en el análisis.

Como se puede ver en la [Tabla 4.7](#), en todos los casos analizados (ver Capítulo 3, sección 3.6) se cumple la normativa ya que se encuentran por debajo del límite considerado (0,49). Cuando se emplea el material basado en jacinto de agua y yeso, denominado WHS-B-50 (ver Caso 2) o el material basado completamente en jacinto de agua (WHS-B-100) (ver Caso 3) los valores de U obtenidos son ligeramente superiores al obtenido en el Caso 1, si bien se sigue cumpliendo la normativa y confirma la aplicabilidad del jacinto de agua en este sector. Para una vivienda como la que se ha considerado en este proyecto, con una superficie total de los cerramientos de 216,74 m², el uso del jacinto de agua supondría un ahorro en material comercial por cada m². Tanto en el Caso 2 como en el Caso 3, es menor el espesor de la lana de vidrio que en la Caso 1, lo que supondría un ahorro económico. La lana de vidrio con un espesor de 8 cm tiene un coste medio de 20,55 €/m² (Isover, 2023) y la de un espesor de 6 cm tiene un coste de 15,45 €/m² (Isover, 2023). Por tanto, en los casos en los que empleamos menor espesor de lana de vidrio se podría ahorrar hasta un total de 5,10 €/m². Si tenemos en cuenta que la vivienda tiene una superficie total de los cerramientos de 216,74 m², se podría estimar un ahorro total de 1105,37 €. A pesar de esta estimación, para llegar a un dato más exacto sería necesario un estudio más completo que contemplara todas las partidas, si bien el objetivo de este estudio es comprobar el ahorro en lana de vidrio con la incorporación del nuevo material.

Por otro lado, en la [Tabla 4.7](#) también se muestran los resultados relativos a la calificación energética obtenida en base a las posibles emisiones de CO₂ emitidas anualmente (según los consumos de energía de los servicios de calefacción, refrigeración, ACS⁵ e iluminación) en cada uno de los tres casos considerados y que proporciona el programa *Cypetherm HE Plus* con las condiciones iniciales seleccionadas. Los resultados indican para todos los casos una clasificación energética de A con emisiones de CO₂ anuales muy similares, siendo las obtenidas para el Caso 3, que considera el material WHS-B-100, las más baja después del Caso 1 en donde solo se consideran materiales comerciales. Dado que los valores de U (W/m²K) y las emisiones de CO₂ (kgCO₂/m²·año) anuales son bastante similares en los tres casos, el uso de este biomaterial en el muro de la envolvente de la vivienda considerada sería interesante, sobre todo desde el punto de vista económico.

En resumen, además de demostrar que emplear un material basado en jacinto de agua es posible en este sector, aún sin poder sustituir el material aislante ni el yeso, en combinación con ambos, se obtienen algunas ventajas. Se puede llegar a reducir significativamente los costes al emplear menos lana de vidrio en la construcción.

⁵ ACS: Agua Caliente Sanitaria

Asimismo, se reduciría el uso de materiales menos sostenibles no biodegradables, como es el caso del yeso, reduciendo la cantidad empleada y se daría una salida al jacinto de agua, que es una especie invasora abundante en la naturaleza.

Tabla 4.7. Valores del coeficiente global de transferencia de calor, U, emisiones de CO₂ y clasificación energética obtenido con el programa Cypetherm HE Plus en base a las condiciones seleccionadas.

Caso supuesto	U (W/m ² K)	Calificación energética y emisiones de CO ₂ anuales																					
<p>Caso 1</p> <p>Fachada aislada</p> <p>Listado de capas:</p> <ol style="list-style-type: none"> Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido 1000 < d < 1250 2.00 cm 1/2 pie LP métrico o catalán 60 mm< G < 80 mm 15.00 cm Lanade vidrio CLIMA 34 ISOVER 8.00 cm Placa de yeso o escayola 750 < d < 900 1.50 cm <p>Características Transmitancia térmica, U: 0.35 W/(m²K) Espesor total 26.50 cm</p>	0,35	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">INDICADOR GLOBAL</th> <th colspan="2">INDICADORES PARCIALES</th> </tr> <tr> <th>CALEFACCIÓN</th> <th>ACS</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2"> </td> <td>Emisiones calefacción [kgCO₂/m²-año]</td> <td>Emisiones ACS [kgCO₂/m²-año]</td> </tr> <tr> <td>3.95</td> <td>1.19</td> </tr> <tr> <td rowspan="2"> </td> <td>REFRIGERACIÓN</td> <td>ILUMINACIÓN</td> </tr> <tr> <td>Emisiones refrigeración [kgCO₂/m²-año]</td> <td>Emisiones iluminación [kgCO₂/m²-año]</td> </tr> <tr> <td></td> <td>1.69</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td colspan="3">Emisiones globales: 7,78 kgCO₂/m²-año</td> </tr> </tbody> </table>	INDICADOR GLOBAL	INDICADORES PARCIALES		CALEFACCIÓN	ACS		Emisiones calefacción [kgCO ₂ /m ² -año]	Emisiones ACS [kgCO ₂ /m ² -año]	3.95	1.19		REFRIGERACIÓN	ILUMINACIÓN	Emisiones refrigeración [kgCO ₂ /m ² -año]	Emisiones iluminación [kgCO ₂ /m ² -año]		1.69	-	Emisiones globales: 7,78 kgCO ₂ /m ² -año		
INDICADOR GLOBAL	INDICADORES PARCIALES																						
	CALEFACCIÓN	ACS																					
	Emisiones calefacción [kgCO ₂ /m ² -año]	Emisiones ACS [kgCO ₂ /m ² -año]																					
	3.95	1.19																					
	REFRIGERACIÓN	ILUMINACIÓN																					
	Emisiones refrigeración [kgCO ₂ /m ² -año]	Emisiones iluminación [kgCO ₂ /m ² -año]																					
	1.69	-																					
Emisiones globales: 7,78 kgCO ₂ /m ² -año																							
<p>Caso 2</p> <p>Fachada aislada</p> <p>Listado de capas:</p> <ol style="list-style-type: none"> Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido 1000 < d < 1250 2.00 cm 1/2 pie LP métrico o catalán 60 mm< G < 80 mm 15.00 cm Lanade vidrio CLIMA 34 ISOVER 6.00 cm Placa WHS-B-50 2.50 cm Placa de yeso o escayola 750 < d < 900 1.00 cm <p>Características Transmitancia térmica, U: 0.42 W/(m²K) Espesor total 26.50 cm</p>	0,42	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">INDICADOR GLOBAL</th> <th colspan="2">INDICADORES PARCIALES</th> </tr> <tr> <th>CALEFACCIÓN</th> <th>ACS</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2"> </td> <td>Emisiones calefacción [kgCO₂/m²-año]</td> <td>Emisiones ACS [kgCO₂/m²-año]</td> </tr> <tr> <td>4.32</td> <td>1.19</td> </tr> <tr> <td rowspan="2"> </td> <td>REFRIGERACIÓN</td> <td>ILUMINACIÓN</td> </tr> <tr> <td>Emisiones refrigeración [kgCO₂/m²-año]</td> <td>Emisiones iluminación [kgCO₂/m²-año]</td> </tr> <tr> <td></td> <td>1.7</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td colspan="3">Emisiones globales: 8,16 kgCO₂/m²-año</td> </tr> </tbody> </table>	INDICADOR GLOBAL	INDICADORES PARCIALES		CALEFACCIÓN	ACS		Emisiones calefacción [kgCO ₂ /m ² -año]	Emisiones ACS [kgCO ₂ /m ² -año]	4.32	1.19		REFRIGERACIÓN	ILUMINACIÓN	Emisiones refrigeración [kgCO ₂ /m ² -año]	Emisiones iluminación [kgCO ₂ /m ² -año]		1.7	-	Emisiones globales: 8,16 kgCO ₂ /m ² -año		
INDICADOR GLOBAL	INDICADORES PARCIALES																						
	CALEFACCIÓN	ACS																					
	Emisiones calefacción [kgCO ₂ /m ² -año]	Emisiones ACS [kgCO ₂ /m ² -año]																					
	4.32	1.19																					
	REFRIGERACIÓN	ILUMINACIÓN																					
	Emisiones refrigeración [kgCO ₂ /m ² -año]	Emisiones iluminación [kgCO ₂ /m ² -año]																					
	1.7	-																					
Emisiones globales: 8,16 kgCO ₂ /m ² -año																							
<p>Caso 3</p> <p>Fachada aislada</p> <p>Listado de capas:</p> <ol style="list-style-type: none"> Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido 1000 < d < 1250 2.00 cm 1/2 pie LP métrico o catalán 60 mm< G < 80 mm 15.00 cm Lana de vidrio CLIMA 34 ISOVER 6.00 cm Placa WHS-B-100 2.50 cm Placa de yeso o escayola 750 < d < 900 1.00 cm <p>Características Transmitancia térmica, U: 0.42 W/(m²K) Espesor total 26.50 cm</p>	0,42	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">INDICADOR GLOBAL</th> <th colspan="2">INDICADORES PARCIALES</th> </tr> <tr> <th>CALEFACCIÓN</th> <th>ACS</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2"> </td> <td>Emisiones calefacción [kgCO₂/m²-año]</td> <td>Emisiones ACS [kgCO₂/m²-año]</td> </tr> <tr> <td>4.28</td> <td>1.19</td> </tr> <tr> <td rowspan="2"> </td> <td>REFRIGERACIÓN</td> <td>ILUMINACIÓN</td> </tr> <tr> <td>Emisiones refrigeración [kgCO₂/m²-año]</td> <td>Emisiones iluminación [kgCO₂/m²-año]</td> </tr> <tr> <td></td> <td>1.7</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td colspan="3">Emisiones globales: 8,12 kgCO₂/m²-año</td> </tr> </tbody> </table>	INDICADOR GLOBAL	INDICADORES PARCIALES		CALEFACCIÓN	ACS		Emisiones calefacción [kgCO ₂ /m ² -año]	Emisiones ACS [kgCO ₂ /m ² -año]	4.28	1.19		REFRIGERACIÓN	ILUMINACIÓN	Emisiones refrigeración [kgCO ₂ /m ² -año]	Emisiones iluminación [kgCO ₂ /m ² -año]		1.7	-	Emisiones globales: 8,12 kgCO ₂ /m ² -año		
INDICADOR GLOBAL	INDICADORES PARCIALES																						
	CALEFACCIÓN	ACS																					
	Emisiones calefacción [kgCO ₂ /m ² -año]	Emisiones ACS [kgCO ₂ /m ² -año]																					
	4.28	1.19																					
	REFRIGERACIÓN	ILUMINACIÓN																					
	Emisiones refrigeración [kgCO ₂ /m ² -año]	Emisiones iluminación [kgCO ₂ /m ² -año]																					
	1.7	-																					
Emisiones globales: 8,12 kgCO ₂ /m ² -año																							
<p>Caso 4</p> <p>Fachada aislada</p> <p>Listado de capas:</p> <ol style="list-style-type: none"> Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido 1000 < d < 1250 2.00 cm 1/2 pie LP métrico o catalán 60 mm< G < 80 mm 15.00 cm Panel aislante Jacinto de agua Salas et al. 2019 8.00 cm Placa de yeso o escayola 750 < d < 900 1.50 cm <p>Características Transmitancia térmica, U: 0.45 W/(m²K) Espesor total 26.50 cm</p>	0,45	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">INDICADOR GLOBAL</th> <th colspan="2">INDICADORES PARCIALES</th> </tr> <tr> <th>CALEFACCIÓN</th> <th>ACS</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2"> </td> <td>Emisiones calefacción [kgCO₂/m²-año]</td> <td>Emisiones ACS [kgCO₂/m²-año]</td> </tr> <tr> <td>4.45</td> <td>1.19</td> </tr> <tr> <td rowspan="2"> </td> <td>REFRIGERACIÓN</td> <td>ILUMINACIÓN</td> </tr> <tr> <td>Emisiones refrigeración [kgCO₂/m²-año]</td> <td>Emisiones iluminación [kgCO₂/m²-año]</td> </tr> <tr> <td></td> <td>1.71</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td colspan="3">Emisiones globales: 8,31 kgCO₂/m²-año</td> </tr> </tbody> </table>	INDICADOR GLOBAL	INDICADORES PARCIALES		CALEFACCIÓN	ACS		Emisiones calefacción [kgCO ₂ /m ² -año]	Emisiones ACS [kgCO ₂ /m ² -año]	4.45	1.19		REFRIGERACIÓN	ILUMINACIÓN	Emisiones refrigeración [kgCO ₂ /m ² -año]	Emisiones iluminación [kgCO ₂ /m ² -año]		1.71	-	Emisiones globales: 8,31 kgCO ₂ /m ² -año		
INDICADOR GLOBAL	INDICADORES PARCIALES																						
	CALEFACCIÓN	ACS																					
	Emisiones calefacción [kgCO ₂ /m ² -año]	Emisiones ACS [kgCO ₂ /m ² -año]																					
	4.45	1.19																					
	REFRIGERACIÓN	ILUMINACIÓN																					
	Emisiones refrigeración [kgCO ₂ /m ² -año]	Emisiones iluminación [kgCO ₂ /m ² -año]																					
	1.71	-																					
Emisiones globales: 8,31 kgCO ₂ /m ² -año																							

Si bien se han obtenido estos datos en base a los estudios llevados a cabo en la presente tesis doctoral, para comprobar realmente la aplicabilidad de este material como un aislante térmico, sería necesario realizar un estudio más completo del mismo mediante otras técnicas de caracterización. Así, se puede comprobar como la técnica empleada para la medición de la conductividad térmica puede arrojar valores más elevados que en otros casos. Por ejemplo, Salas et al. (2019) han obtenido un valor de conductividad térmica para el jacinto de agua, con un tamaño de partícula igual o

superior a 2 mm, de 0,047 W/mK, pudiendo considerar dicho material como aislante térmico. Por lo tanto, si cogemos este material y realizamos una simulación con una variante del caso 1, donde sustituimos el material aislante de lana de vidrio por el jacinto de agua, se obtiene lo siguiente: un valor de U superior al de todos los casos, pero que aún se encuentra por debajo del límite permitido; y unas emisiones de CO₂, ligeramente superiores pero muy similares a las de los otros casos. Por otro lado, se obtienen diferentes ventajas, un ahorro total en lana de vidrio, sustituyendo ésta por el jacinto de agua como material aislante, que además logra dar salida a este residuo abundante en la naturaleza.

4.6. CONCLUSIONES

El estudio realizado ha mostrado que la conductividad térmica de los materiales preparados en esta tesis doctoral es baja, habiéndose obtenido muestras con valores similares a los que muestra la literatura en el caso de otras biomásas. Asimismo, ha podido comprobarse que la resistencia a la transferencia de calor de los materiales diseñados viene condicionada por diversos factores y su interpretación es compleja. En particular, el presente capítulo ha arrojado las siguientes conclusiones:

- Las propiedades de aislamiento térmico de las muestras preparadas solo con WHS dependen en mayor o menor medida del tamaño de partícula y del grado de compactación del material. Concretamente:
 - La aplicación de una mayor carga de compactación tiene como consecuencia en todos los casos, independientemente del tamaño de partícula, un aumento de la densidad.
 - El efecto del tamaño de partícula en el valor de conductividad térmica es diferente según la carga empleada. Así, para la mayor carga y un menor tamaño de partícula de WHS favorece una mayor resistencia a la transferencia de calor, mientras que, si se aplica una carga menor, el efecto es el contrario y los tamaños mayores de partícula conllevan un menor valor de la conductividad térmica. El efecto conjunto del aire inter e intraparticular condicionado por la carga aplicada, del propio tamaño de partícula en la composición del material y de la absorción diferencial de vapor agua ambiental podrían estar condicionando estos resultados.
 - El valor más bajo de conductividad térmica, 0,156 W/mK corresponde a la muestra elaborada con tamaño de partícula A (< 0,5 mm) y una carga de 2 t.

- La inclusión de un ligante extra en las muestras preparadas solo con WHS conlleva un claro aumento de la conductividad térmica del material compuesto, similar para el almidón y la cola.
- Las propiedades de aislamiento térmico de las muestras preparadas con WHS y yeso también dependen de la proporción WHS:G, del tamaño de partícula, del grado de compactación del material. Específicamente:
 - La incorporación de WHS al yeso incrementa el aislamiento térmico en diferentes medidas, dando lugar a reducciones del valor de la conductividad térmica de hasta el 52%.
 - El incremento de la carga empleada en la fabricación de las muestras de 1 a 2 t es beneficioso en cuanto a la mejora en la capacidad aislante de las muestras preparadas. La aplicación de la carga manual mostró verse influenciada por los valores de fuerza aplicados, por el tamaño de partícula empleado; en el caso de ratios WHS/G de 1:1, los resultados mostraron que dicha carga estaba cercana a 2 t.
 - La mezcla de la biomasa con materiales constructivos conlleva un ligero aumento de la conductividad térmica para el material compuesto en referencia a la del WHS solo, más leve en el caso del uso de resina.
- La simulación sobre la calificación energética y la resistencia térmica total en un estudio de caso de una vivienda unifamiliar con forme a los diferentes casos de estudio ha demostrado, principalmente, la aplicabilidad del jacinto de agua en el sector de la construcción. Si bien, en base a los estudios actuales, no se puede considerar como un material sustitutivo de otros materiales, sí puede ser aplicable en combinación con estos, obteniéndose algunas ventajas, como dar salida a un recurso abundante en la naturaleza y ahorrar en otros materiales comunes. Cabe destacar que se hacen necesarios estudios más completos sobre este material como posible aislante térmico.
- Como futura investigación se propone controlar el contenido de humedad antes de la medida de la conductividad, sobre todo de las muestras basadas solo en biomazas compactadas. Asimismo, un completo análisis de la merma de las propiedades mecánicas de los materiales compuestos sería necesario para garantizar la viabilidad del material a nivel comercial, así como la propuesta de revestimientos en los mismos para mejorar dicho efecto.

REFERENCIAS

- Abu-Jdayil, B., 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>
- Al-Homoud, M. S. (2005). Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials. *Building and Environment*, 40(3), 353-366. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.05.013>
- Ali, M., Alabdulkarem, A., Nuhait, A., Al-Salem, K., Iannace, G., y Almuzaiqer, R. (2021). Characteristics of agro waste fibers as new thermal insulation and sound absorbing materials: Hybrid of date palm tree leaves and wheat straw fibers. *Journal of Natural Fibers*, 19(13), 6576-6594. <https://doi.org/10.1080/15440478.2021.1929647>
- Asadi, I., Shafigh, P., Abu Hassan, Z. F. Bin, y Mahyuddin, N. B. (2018). Thermal conductivity of concrete: A review. *Journal of Building Engineering*, 20, 81-93. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.07.002>
- ASTM D7984-16. (2021). ASTM D7984-16. *Standard test method for measurement of thermal effusivity of fabrics using a modified transient plane source (MTPS) instrument*. <https://doi.org/10.1520/D7984-21>
- Bhuvaneshwari, M., y Sangeetha, K. (2017a). Development of water hyacinth nonwoven fabrics for thermal insulation. *Journal on Future Engineering and Technology*, 13(1), 22. <https://doi.org/10.26634/jfet.13.1.13759>
- Bhuvaneshwari, M., y Sangeetha, K. (2017b). Effect of blending ratio of water hyacinth fibers on the properties of needle punched nonwoven fabrics. *International Journal of Technical Research and Applications*, 5(2), 90-94.
- Cannon, J. R., y Browder, F. E. (1984). *The One-Dimensional Heat Equation*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139086967>
- Canto, A., Batista, M., Sanchez, J., Moreno, M., y James, A. (2018). Development of a thermal-insulation based on organic materials. *Revista de Iniciación Científica*, 4, 48-51.
- Christy, E. O., Soemarno, Sumarlan, S. H., y Soehardjono, A. (2021). Binderless bark particleboard made from gelam (*malaleuca viridiflora sol. ex gaertn.*) bark waste:

- The effect of the pressing temperature on its mechanical and physical properties. *Bioresources*, 16(2), 4171-4199.
- David, R., Shafi, K. A., V. B., y Aziz S, S. (2022). Experimental investigation of the thermal insulation properties of water hyacinth - rice straw composite materials. *Proceedings of the International Conference on Aerospace & Mechanical Engineering (ICAME 21)*, 1-2. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4102269>
- Durakovic, B., Yildiz, G., y Yahia, M. E. (2020). Comparative performance evaluation of conventional and renewable thermal insulation materials used in building envelopes. *Tehnicki Vjesnik*, 27(1), 283-289. <https://doi.org/10.17559/TV-20171228212943>
- Ferrandez-Garcia, M. T., Ferrandez-Garcia, A., Garcia-Ortuño, T., Ferrandez-Garcia, C. E., y Ferrandez-Villena, M. (2020). Influence of particle size on the properties of boards made from washingtonia palm rachis with citric acid. *Sustainability*, 12(12), 4841. <https://doi.org/10.3390/su12124841>
- Ferrandez-Villena, M., Ferrandez-Garcia, C. E., Garcia-Ortuño, T., Ferrandez-Garcia, A., y Ferrandez-Garcia, M. T. (2020). Properties of cement-bonded particleboards made from Canary Islands palm (phoenix canariensis ch.) trunks and different amounts of potato starch. *Forests*, 11(5), 560. <https://doi.org/10.3390/f11050560>
- Gnip, I., Vejelis, S., y Vaitkus, S. (2012). Thermal conductivity of expanded polystyrene (EPS) at 10 °C and its conversion to temperatures within interval from 0 to 50 °C. *Energy and Buildings*, 52, 107-111. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.05.029>
- Gößwald, J., Barbu, M.-C., Petutschnigg, A., y Tudor, E. M. (2021). Binderless thermal insulation panels made of spruce bark fibres. *Polymers*, 13(11), 1799. <https://doi.org/10.3390/polym13111799>
- Hankhuntut, P., Phoo-Ngernkham, T., y Krittacom, B. (2022a). Microstructure and mechanical properties of gypsum board produced from water hyacinth fiber. *Materials Science Forum*, 1058, 119-126. <https://doi.org/10.4028/p-a4325q>
- Harris, A., Kazachenko, S., Bateman, R., Nickerson, J., y Emanuel, M. (2014). Measuring the thermal conductivity of heat transfer fluids via the modified transient plane source (MTPS). *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 116(3), 1309-1314. <https://doi.org/10.1007/s10973-014-3811-6>
- Holman, J. P. (1999). Transferencia de calor. McGraw Hill, México.

- Hung Anh, L. D., y Pásztor, Z. (2021). An overview of factors influencing thermal conductivity of building insulation materials. *Journal of Building Engineering*, 44, 102604. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102604>
- IDAE (2023). *Código Técnico de la Edificación*. <https://www.idae.es/tecnologias/eficiencia-energetica/edificacion/codigo-tecnico-de-la-edificacion#:~:text=>.
- IEA (2021). Key World Energy Statistics 2021 – Statistics Report. *IEA Publications*, 1-82.
- IETCC (2010). Catálogo de elementos constructivos del CTE. *Código Técnico de la Edificación CTE*, 3, 141. <https://www.codigotecnico.org/index.html>
- Isover (2023). *Lana mineral Clima 34*. ISOVER - Saint Govain. <https://www.isover.es/products/isover-clima-34>
- Jaktorn, C., y Jiajitsawat, S. (2014). Production of thermal insulator from water hyacinth fiber and natural rubber latex. *International Journal of Science*, 11(2), 31-41.
- Jayamani, E., Hamdan, S., y Rahman, M. R. (2014). Synthesis and characterization of epoxy resin reinforced with luffa fiber composites for sound absorption. *Applied Mechanics and Materials*, 624, 36-41. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.624.36>
- Jelle, B. P. (2011). Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions - Properties, requirements and possibilities. *Energy and Buildings*, 43(10), 2549-2563. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.05.015>
- Li, P. (2023). Annual Report 2022. *AIMS Energy*, 11(1), 135-139. <https://doi.org/10.3934/energy.2023007>
- Li, Y., Shi, C., Liu, J., Liu, E., Shao, J., Chen, Z., Dorantes-Gonzalez, D. J., y Hu, X. (2014). Improving the accuracy of the transient plane source method by correcting probe heat capacity and resistance influences. *Measurement Science and Technology*, 25(1), 015006. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/25/1/015006>
- Liu, L., Li, H., Lazzaretto, A., Manente, G., Tong, C., Liu, Q., y Li, N. (2017). The development history and prospects of biomass-based insulation materials for buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 912-932. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.140>
- Liu, L., Li, Y., y Long, L. (2022). Application research of a biomass insulation material: Eliminating building thermal bridges. *Sustainability*, 14(12), 6983.

<https://doi.org/10.3390/su14126983>

- Liuzzi, S., Rubino, C., Stefanizzi, P., Petrella, A., Boghetich, A., Casavola, C., y Pappalettera, G. (2018). Hygrothermal properties of clayey plasters with olive fibers. *Construction and Building Materials*, 158, 24-32. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.013>
- Mendoza, L. G. F., y Co, W. M. (2019). Production of thermal wall insulation from water hyacinth (*eichhornia cressipes*) and cogon grass (*imperata cylindrica*). *IEEE Integrated STEM Education Conference (ISEC)*, 18-19.
- Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana. (2022). DB HE - Ahorro de Energía. *Código Técnico de la Edificación*, 1-129. <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HE/DBHE.pdf>
- Nguyen, D. M., Grillet, A. C., Diep, T. M. H., Bui, Q. B., y Woloszyn, M. (2018). Influence of thermo-pressing conditions on insulation materials from bamboo fibers and proteins based bone glue. *Industrial Crops and Products*, 111, 834-845. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.12.009>
- Nguyen, T. T., Picandet, V., Carre, P., Lecompte, T., Amziane, S., y Baley, C. (2010). Effect of compaction on mechanical and thermal properties of hemp concrete. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 14(5), 545-560. <https://doi.org/10.1080/19648189.2010.9693246>
- Nguyen, T. T. Van, Tri, N., Tran, B. A., Dao Duy, T., Nguyen, S. T., Nguyen, T. A., Phan, A. N., Mai Thanh, P., y Huynh, H. K. P. (2021). Synthesis, characteristics, oil adsorption, and thermal insulation performance of cellulosic aerogel derived from water hyacinth. *ACS Omega*, 6(40), 26130-26139. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c03137>
- Niyasom, S., y Tangboriboon, N. (2021). Development of biomaterial fillers using eggshells, water hyacinth fibers, and banana fibers for green concrete construction. *Construction and Building Materials*, 283, 122627. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122627>
- Nomura, S., y Haji-Sheikh, A. (2018). *Heat Transfer in Composite Materials*. DEStech Publications, Inc.
- Palacios, A., Cong, L., Navarro, M. E., Ding, Y., y Barreneche, C. (2019). Thermal conductivity measurement techniques for characterizing thermal energy storage

- materials – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 108, 32-52. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.03.020>
- Palomo, M. (2017). Aislantes térmicos. Criterios de selección por requisitos energéticos. Trabajo Fin de Grado, Universidad Politecnica de Madrid (p. 65). http://oa.upm.es/47071/1/TFG_Palomo_Cano_Marta.pdf
- Panyakaew, S., y Fotios, S. (2011). New thermal insulation boards made from coconut husk and bagasse. *Energy and Buildings*, 43(7), 1732-1739. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2011.03.015>
- Philip, S., y Rakendu, R. (2020). Thermal insulation materials based on water hyacinth for application in sustainable buildings. *Materials Today: Proceedings*, 33, 3803-3809. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.219>
- Pisello, A. L., Fabiani, C., Makaremi, N., Castaldo, V. L., Cavalaglio, G., Nicolini, A., Barbanera, M., y Cotana, F. (2016). Sustainable new brick and thermo-acoustic insulation panel from mineralization of stranded driftwood residues. *Energies*, 9(8), 619. <https://doi.org/10.3390/en9080619>
- Rabbat, C., Awad, S., Villot, A., Rollet, D., y Andrès, Y. (2022). Sustainability of biomass-based insulation materials in buildings: Current status in France, end-of-life projections and energy recovery potentials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (156), 111962. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111962>
- Salas-Ruiz, A., y Barbero-Barrera, M. del M. (2019). Performance assessment of water hyacinth–cement composite. *Construction and Building Materials*, 211, 395-407. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.217>
- Salas-Ruiz, A., del Mar Barbero-Barrera, M., y Ruiz-Téllez, T. (2019). Microstructural and thermo-physical characterization of a water hyacinth petiole for thermal insulation particle board manufacture. *Materials*, 12(4), 560. <https://doi.org/10.3390/ma12040560>
- Salim, S. G. R. (2022). Thermal conductivity measurements using the transient hot-wire method: A review. *Measurement Science and Technology*, 33(12), 125022. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ac90df>
- Sharma, A., Singh, P. K., y Sharma, V. K. (2021). Analysis on WH cement composite thermal insulation material for increasing efficiency of building. *Materials Today: Proceedings*, 45, 3036-3041. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.056>

- Singh, S., Maiti, S., Bisht, R. S., Balam, N. B., Solanki, R., Chourasia, A., y Panigrahi, S. K. (2022). Performance behaviour of agro-waste based gypsum hollow blocks for partition walls. *Scientific Reports*, 12(1), 1-16. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-07057-y>
- Sruti, N. M. K. S., Jenaneswari, P. R., Rahayu, M. R., y Syamani, F. (2021). Utilization of water hyacinth (*eichhornia crassipes*) and corncob (*zea mays*) in epoxy-based biocomposite board for cool box thermal insulation material. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 891(1), 012001. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/891/1/012001>
- UNE-EN-ISO. (2007). UNE-EN ISO 6946:2021. *Componentes y elementos para la edificación - Resistencia térmica y transmitancia térmica - Método de cálculo*, 40. www.inn.cl
- Venkataraman, M., y Militky, R. M. J. (2014). Unconventional methods to study thermodynamics of aerogel treated fabrics. *XIIIth International Izmir Textile and Apparel Symposium*, 378-383.
- Xu, J., Sugawara, R., Widyorini, R., Han, G., y Kawai, S. (2004). Manufacture and properties of low-density binderless particleboard from kenaf core. *Journal of Wood Science*, 50(1), 62-67. <https://doi.org/10.1007/s10086-003-0522-1>
- Yang, J. (2004). Theory of Thermal Conductivity. En Tritt, T. M. (Ed.), *Thermal Conductivity Theory, Properties, and Applications*. Springer. <https://doi.org/10.1007/b136496>
- Zhao, D., Qian, X., Gu, X., Jajja, S. A., y Yang, R. (2016). Measurement techniques for thermal conductivity and interfacial thermal conductance of bulk and thin film materials. *Journal of Electronic Packaging*, 138(4), 040802. <https://doi.org/10.1115/1.4034605>
- Zhao, J. R., Zheng, R., Tang, J., Sun, H. J., y Wang, J. (2022). A mini-review on building insulation materials from perspective of plastic pollution: Current issues and natural fibres as a possible solution. *Journal of Hazardous Materials*, 438, 129449. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129449>
- Zhou, X. Y., Zheng, F., Li, H. guan, y Lu, C. long. (2010). An environment-friendly thermal insulation material from cotton stalk fibers. *Energy and Buildings*, 42(7), 1070-1074. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2010.01.020>



CAPÍTULO 5

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO ACÚSTICO DE
MATERIALES BASADOS EN TALLO DE JACINTO DE AGUA
(*EICHHORNIA CRASSIPES*)**

Resumen del capítulo

Para controlar el ruido por vía aérea en un recinto cerrado o mejorar su acondicionamiento acústico, se recurre habitualmente a los adsorbentes sonoros, siendo los más utilizados aquellos contruidos con materiales porosos. En los últimos años, se han incrementado las investigaciones relacionadas con el estudio y desarrollo de “ecomateriales acústicos” porosos, como los materiales reciclados y de base biológica. En el presente capítulo se estudian las características acústicas de una serie de muestras preparadas a base de tallo de jacinto de agua (WHS, de aquí en adelante haciendo referencia a sus siglas en inglés *water hyacinth stem*) con la finalidad de comprender su comportamiento y optimizar su posible aplicación como absorbente acústico. Para la preparación de las muestras se han tenido en cuenta variables tales como su espesor, la cantidad de WHS en la muestra, el tamaño de partícula del WHS o el tipo de aglutinante o ligante. La absorción acústica de los materiales preparados se ha determinado mediante el método normalizado de la función de transferencia. Los resultados indican que el rendimiento acústico de las muestras preparadas solo con WHS depende del tamaño de partícula, el grado de compactación y el espesor de la muestra. Las muestras preparadas con un tamaño de partícula de WHS de 1 a 2 mm compactadas de forma manual y con 14 mm de espesor mostraron el valor más elevado del coeficiente de absorción ponderado, α_w . Por otro lado, la cantidad de WHS ha sido determinante en el rendimiento acústico de las muestras compuestas por WHS y yeso, siendo la proporción más favorable la más alta considerada (1:1) independientemente del tamaño de partícula del WHS. Finalmente, el tipo de material ligante o aglutinante utilizado en las muestras ha sido también una variable importante que ha afectado significativamente la capacidad de absorción del sonido. La muestra preparada con WHS con un tamaño de partícula de 0,5 a 1 mm mezclada con yeso en una proporción 1:1 y compactada de forma manual con 14 mm de espesor alcanzó un valor α_w más elevado que el observado para la muestra de cemento obtenida bajo las mismas condiciones de preparación y cantidad de WHS. Los valores obtenidos en este trabajo y los publicados en la literatura para otro tipo de materiales biomásicos indican que el WHS tiene buen potencial para ser explorado y utilizado, solo o combinado con otros materiales, como material para acondicionamiento acústico.

CONTENIDO

5.1. INTRODUCCIÓN	191
5.2. FUNDAMENTO TEÓRICO.....	197
5.2.1 Absorción del sonido.....	197
5.2.2 Características de los materiales absorbentes sonoros	202
5.2.3 Medida de la absorción acústica con el método tubo de impedancia	205
5.3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	210
5.3.1. Materiales	210
5.3.2. Instrumentación de medida.....	212
5.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	215
5.4.1. Muestras preparadas únicamente con WHS.....	215
5.4.2. Materiales a base de WHS mezclado con yeso	225
5.4.3. Materiales a base de WHS combinado con otros materiales constructivos..	235
5.5 CONCLUSIONES	239
REFERENCIAS	241
CAPÍTULO 6.....	250
ANEXOS.....	254

5.1. INTRODUCCIÓN

Según la *Guía de aplicación del DB-HR* (Carrascal García et al., 2016), el aislamiento y el acondicionamiento acústico son los dos conceptos principales en el ámbito de la acústica arquitectónica o de la edificación. Los objetivos de uno y otro, aunque están relacionados entre sí, son distintos, pero suelen emplearse conjuntamente para unir y complementar su potencial.

Por un lado, en la guía anteriormente citada, se denomina *aislamiento acústico en el interior* “al conjunto de procedimientos empleados para reducir o evitar la transmisión de ruidos (tanto aéreos como estructurales) de un recinto a otro o desde el exterior hacia el interior de un recinto o viceversa, con el fin de obtener una calidad acústica determinada” (p. 10). El aislamiento acústico implicará por tanto a dos recintos, uno emisor y otro receptor. También, en este mismo documento, se define el *acondicionamiento acústico* como “una serie de medidas que se toman para conseguir en un recinto unas condiciones acústicas y un ambiente sonoro interior determinados conforme al uso que se le va a dar al recinto” (p.10). Este acondicionamiento acústico implicará pues a un único recinto.

En el contexto del acondicionamiento acústico, cuando una onda sonora se propaga dentro de un recinto esta se reflejará en todas las superficies que lo constituyen. Las reflexiones originadas seguirán propagándose y volviendo a incidir con las superficies del recinto dando lugar a otras reflexiones de mayor orden (ver [Figura 5.1](#)). Las contribuciones del sonido que llegan a las personas a través de las vías directas y reflejadas están determinadas por lo bien que se refleja y absorbe el sonido por las paredes del recinto (Crocker, 2007).

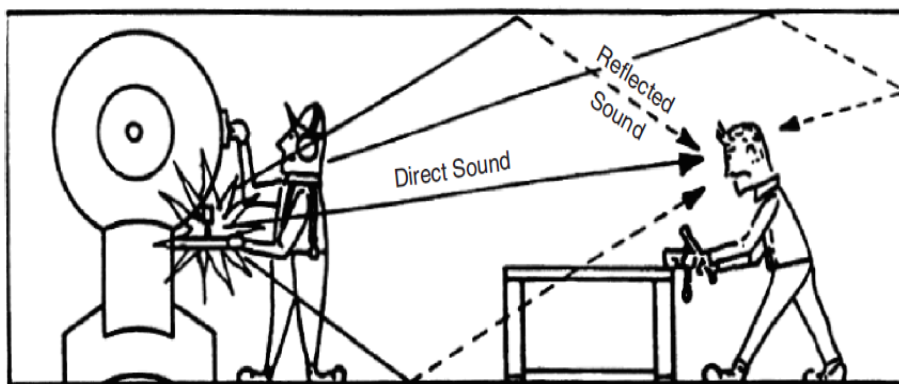


Figura 5.1. Imagen que ilustra el fenómeno de la reverberación en una sala. Fuente: Crocker (2007).

Según Carrascal García et al. (2016), ese “fenómeno de persistencia de la energía sonora en el espacio se conoce como *reverberación*” (Anejo 1, p. 3). Este factor es importante en acústica arquitectónica pues suele determinar el comportamiento acústico de un recinto cerrado, la inteligibilidad de la palabra o el confort acústico (*ambiente sonoro*) del recinto (Carrascal García et al., 2016). En concreto, el parámetro que permite cuantificar el grado de reverberación de una sala o recinto cerrado es el llamado *tiempo de reverberación* (TR). Según el Anejo 1 de la Guía de aplicación del DB-HR (Carrascal García et al., 2016), el TR se define como “el tiempo que se requiere en un espacio cerrado para que un sonido en una frecuencia determinada disminuya 60 dB, después de haber cesado la fuente o bien, el tiempo que transcurre hasta que la densidad de la energía acústica en el recinto decrece una millonésima de su valor inicial.” (p. 23). Por lo general, para obtener un adecuado acondicionamiento acústico, las superficies que envuelven los recintos se revisten con materiales apropiados que reducen las componentes reflejadas del sonido, disminuyendo el TR y aumentando el confort acústico del mismo (Carrascal García et al., 2016).

Este parámetro suele estar relacionado con el acondicionamiento acústico de los recintos y, por tanto, con la absorción acústica de las superficies que lo delimitan (Carrascal García et al., 2016). Así, si para los revestimientos de las paredes se emplean materiales poco absorbentes (por ejemplo, superficies duras y lisas), la sala tendría un TR elevado, mientras que el empleo de materiales absorbentes daría como resultado un TR global más bajo. A modo de ejemplo, según, el Documento Básico de protección frente al ruido o DB-HR (Ministerio de Fomento, 2019), el TR en aulas y en salas de conferencias vacías (sin ocupación y sin mobiliario), cuyo volumen sea menor que 350 m³, no será mayor que 0,7 s.

Tradicionalmente el acondicionamiento acústico ha estado ligado a salas de acústica excepcional como teatros, auditorios, etc. Sin embargo, éste es un aspecto que empieza a tenerse en cuenta otros recintos que a priori puedan parecer de menor relevancia pero que deberían presentar un campo sonoro adecuado, como es el caso de aulas y salas de conferencias, y otros recintos en los que se va a necesitar una buena inteligibilidad de la palabra, como restaurantes y comedores, zonas comunes de los edificios, etc. (Carrascal García et al., 2016).

En una construcción moderna, para reducir el sonido reflejado por las superficies, disminuir todo lo posible el TR y obtener un acabado fonoabsorbente se suelen utilizar varias alternativas. Según Carrascal García et al. (2016), los materiales absorbentes acústicos más utilizados en construcción son materiales porosos y los paneles resonadores (de membrana y perforados).

En los materiales porosos, la absorción acústica se produce normalmente por la disipación de la energía acústica por la fricción que surge entre el aire en el interior de los poros, que vibra debido a las ondas incidentes, y el propio material (Crocker, 2007). En concreto, se cree que existen dos posibles mecanismos principales por los que el sonido es absorbido en los materiales (ver [Figura 5.2](#)): (a) la disipación viscosa de energía por las ondas sonoras a medida que se propagan dentro de los canales estrechos del material y (b) las pérdidas de energía causadas por la fricción entre las fibras del material bajo la influencia de las ondas sonoras (Crocker, 2007). En ambos mecanismos la energía sonora se transforma en calor.

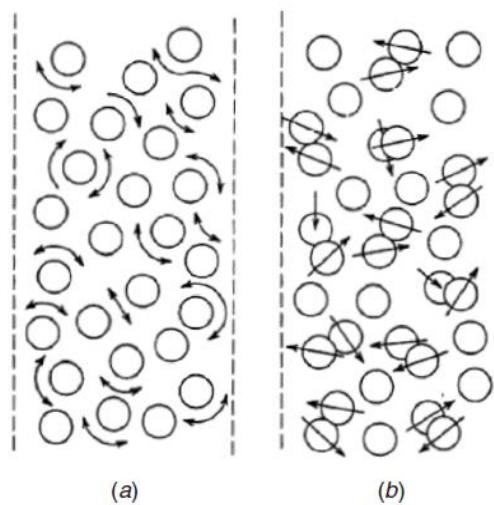


Figura 5.2. Dibujo que ilustra los dos principales mecanismos en materiales que absorben el sonido: (a) las pérdidas viscosas y (b) la fricción mecánica. Fuente: Crocker (2007).

Los materiales absorbentes porosos pueden clasificarse según su configuración microscópica en celulares, fibrosos o granulares como se ilustra en la [Figura 5.3](#) (Arenas y Crocker, 2010). Por lo general, los absorbentes porosos suelen alcanzar su máxima capacidad de absorción a frecuencias altas, y, sobre todo, pueden ser bastante eficaces en frecuencias superiores a 1 kHz (Oldham et al., 2011).

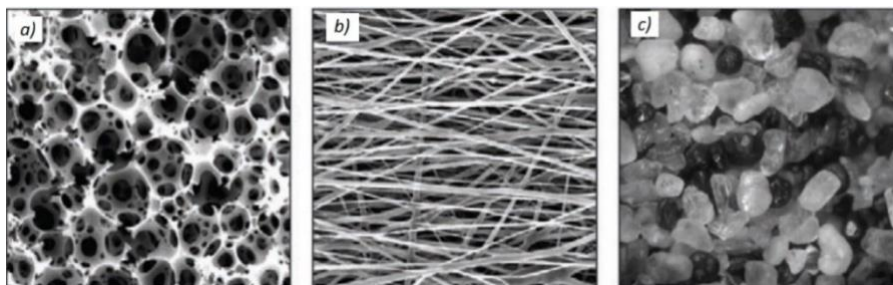


Figura 5.3. Tipos principales de materiales absorbentes porosos: a) celulares, b) fibrosos y c) porosos. Fuente: Arenas y Crocker (2010).

Los *materiales porosos celulares* ([Figura 5.3 a](#)) se caracterizan porque su superficie permite que las ondas de sonido entren en los materiales a través de una multitud de pequeños orificios o aberturas. Los materiales obtenidos con poliuretano de celda abierta y las espumas son ejemplos de este tipo de materiales. Los *materiales fibrosos* constan de una serie de aberturas en forma de túnel formadas por los intersticios o espacios entre las fibras del material ([Figura 5.3 b](#)). Dentro de estos materiales fibrosos se incluyen los preparados con fibras naturales o sintéticas, como las fibras de vidrio y minerales, como la lana de roca. Además, un material absorbente poroso también puede ser *granular* ([Figura 5.3 c](#)). Se distinguen dos tipos: los *agregados* y los *aglomerados* (Arenas y Crocker, 2010). Los primeros consisten en cuerpos macroscópicos relativamente rígidos compuestos de partículas fuertemente ligadas o fusionadas. Los materiales granulares aglomerados consisten en conjuntos de partículas individuales poco compactadas y débilmente ligadas. Algunos ejemplos de materiales comerciales de este tipo son el asfalto, el hormigón poroso, las arcillas granulares, arenas, grava y suelos.

Hoy en día, los materiales porosos artificiales utilizados en los países desarrollados se están tratando de sustituir por otros más sostenibles y fácilmente reciclables con menor energía incorporada con la intención de minimizar todo lo posible las emisiones CO₂. La mayoría de los materiales sostenibles investigados para el control del ruido pueden dividirse en tres categorías: materiales naturales, materiales reciclados y materiales mixtos o compuestos (Asdrubali et al., 2015). Recientemente se han desarrollado y probado muchos productos derivados de biomásas (sin usar aglutinantes o ligantes) para aplicaciones acústicas, ya que se considera que el uso de materiales naturales puede contribuir a lograr una mayor sostenibilidad de los edificios (Asdrubali et al., 2015).

En los últimos años, se han realizado muchas investigaciones relacionadas con el estudio y desarrollo de *ecomateriales acústicos*, de base biológica, empleando diversos métodos de obtención. Entre las metodologías empleadas para la medición de las características acústicas de esos materiales destacan las mediciones de tubos de impedancia y el cálculo del coeficiente de absorción acústica (Alabdulkarem et al., 2018; Buratti et al., 2018; Kinnane et al., 2016; Pedroso et al., 2017). Ciertas investigaciones analizando los coeficientes de absorción acústica de una variedad de biomateriales fibrosos y no fibrosos han llegado a la conclusión de que las fibras naturales son absorbentes eficaces del sonido (Oldham et al., 2011). Resultados similares coinciden con otros publicados por otros autores que estudiaron el comportamiento acústico de fibras de bambú (Koizumi et al., 2002). También, se han estudiado materiales derivados de fibras de celulosa de madera blanda sin blanquear que presentaron propiedades de absorción acústica comparables a las de la lana mineral (Arenas et al., 2014). Otros

investigadores publicaron propiedades eficientes de absorción acústica de distintas fibras naturales, como el yute (Oldham et al., 2011), el algodón (Oldham et al., 2011), el cáñamo (Berardi y Iannace, 2015; Oldham et al., 2011), el kenaf (Berardi y Iannace, 2015; Lim et al., 2018), el coco (Fouladi et al., 2012), el fique (Navacerrada Saturio et al., 2014), el ramio (Liu et al., 2012), el lino (Chabriac et al., 2016), fibras de bambú (Karlinsari et al., 2012), paja de arroz (Marques et al., 2020), fibras de madera (Iannace, 2017a), etc. Otros autores han publicado un estudio de como las propiedades físicas, tales como el grosor, densidad y porosidad pueden influir en el rendimiento de absorción acústica de algunos materiales fibrosos naturales (Samsudin et al., 2016). Una amplia revisión sobre las propiedades acústicas de diferentes *ecomateriales* puede encontrarse también en (Arenas y Asdrubali, 2019).

Así mismo, se han estudiado materiales compuestos preparados con materiales naturales combinados con otros materiales plásticos o convencionales (ej. cemento, yeso) (Liuzzi et al., 2020). Por ejemplo, compuestos basados en biopolímeros y fibras naturales o paja han mostrado un alto potencial como absorbentes de sonidos no deseados (Gliścińska et al., 2019). También, se ha evidenciado el elevado rendimiento acústico de materiales a base de cemento combinados con fibras o partículas vegetales como el cáñamo (Tie et al., 2020), la cáscara de arroz y la paja de arroz (Pachla et al., 2021), y de materiales preparados con yeso mezclado con paja de arroz (Singh et al., 2022). También, en el estudio de la capacidad de absorción acústica de materiales compuestos obtenidos con mezclas de cascarilla de arroz y serrín y resinas fenólicas (Kang et al., 2012), materiales a base de polipropileno reforzado con cáscara de arroz y cáscara de cacahuete (Guna et al., 2020) y otros materiales lignocelulósicos derivados de plantas (Markiewicz et al., 2009), se observó una mejora significativa en las propiedades acústicas del material híbrido o compuesto con respecto al original. Por lo general, el porcentaje de material natural introducido en los materiales mixtos o compuestos es generalmente alto y por esta razón suelen considerarse una solución sostenible. Sin embargo, la mezcla en diferentes proporciones suele afectar en cierta medida a los coeficientes de absorción acústica de los materiales obtenidos (Gliścińska et al., 2019; Mamtaz et al., 2017; Wan et al., 2016).

Como se ha comentado en el Capítulo 3 de esta tesis doctoral, el jacinto de agua (*eichhornia crassipes*), o camalote, es una especie acuática peligrosa e invasora, cuya preocupación mundial ha aumentado considerablemente debido a su rápido crecimiento (Alarcón-Elbal, 2013; Téllez et al., 2008). En concreto, la estructura interna del tallo de esta planta (WHS) ha sido caracterizada con detalle con anterioridad (Salas-Ruiz et al., 2019). Los autores observaron una estructura fibrosa muy porosa y compleja con compartimentos de diferentes tamaños interconectados (ver [Figura 5.4](#)).

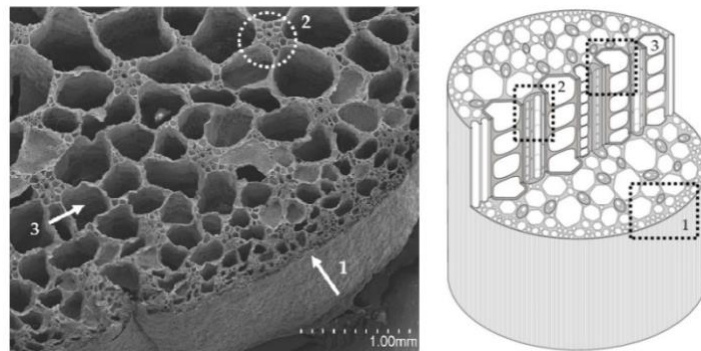


Figura 5.4. Estructura celular del tallo de jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*). Fuente: Salas-Ruiz et al. (2019).

Si bien este material ya ha sido analizado como potencial material para el aislamiento térmico (Bhuvaneshwari y Sangeetha, 2017; David et al., 2022; Hankhunted et al., 2022; Jaktorn y Jiajitsawat, 2014; Mendoza y Co, 2019; Van Nguyen et al., 2021; Philip y Rakendu, 2020; Salas-Ruiz et al., 2019; Salas-Ruiz y Barbero-Barrera, 2019; Sharma et al., 2021; Sruti et al., 2021) solo se han encontrado algunas investigaciones relacionadas con su rendimiento acústico combinado con otros materiales poliméricos como el poliéster, el caucho de estireno butadieno (SBR), el acetato de polivinilo (PVAc) o la espuma de poliuretano (Cayanan et al., 2019; El-Wakil et al., 2021; Elvaswer, 2015; Rohman et al., 2022; Setyowati et al., 2018; Sukhawipat et al., 2021, 2022), arcilla (Setyowati et al., 2021) y de forma natural pero tejido en forma de mantel (Rohman et al., 2022). En concreto, Setyowati et al. (2021) compararon las propiedades acústicas de un compuesto elaborado con jacinto de agua y resina de poliéster y otro elaborado con arcilla y jacinto de agua, observando una mayor absorción acústica en aquellos materiales que presentaban mayor cantidad de jacinto de agua (hasta un 10% en peso). Por otro lado, El-Wakil et al. (2021) analizaron las propiedades mecánicas, acústicas, térmicas y morfológicas de un material compuesto obtenido a partir de fibra de jacinto de agua y SBR. En este estudio se observó un aumento de la absorción a bajas frecuencias con el incremento de la cantidad de jacinto de agua en el material compuesto. También, Cayanan et al. (2019) combinaron la planta de abacá, el bambú y el jacinto de agua con polyester para preparar materiales compuestos con diferentes configuraciones y analizaron sus propiedades acústicas. Estos autores observaron que el compuesto que incorporaba una proporción del 50% en peso de jacinto de agua mostró mejores rendimientos acústicos que los preparados con abacá y bambú. Sukhawipat et al. (2021, 2022) estudiaron las propiedades mecánicas, físicas, morfológicas y acústicas de materiales compuestos a base de espuma de poliuretano reforzado con aceite de palma reciclado y fibra de jacinto de agua. Concluyeron que las fibras de jacinto de agua mejoran significativamente el coeficiente de absorción del sonido a bajas frecuencias y

que los materiales que emplearon un mayor tamaño de partícula de jacinto de agua mostraron los mejores resultados acústicos. Rohman et al. (2022) realizaron un estudio para encontrar un material fonoabsorbente alternativo barato y respetuoso con el medio ambiente empleando el jacinto de agua. En este caso se analiza un fieltro obtenido con jacinto de agua tejido y se aprecia una reducción eficaz del sonido a frecuencias de 500 y 750 Hz, concluyendo que el jacinto de agua es apto como material para amortiguar el sonido.

En casi todos estos estudios se han desarrollado distintos materiales poliméricos o cerámicos empleando el jacinto de agua como relleno o refuerzo con el fin de analizar sus propiedades acústicas. Sin embargo, no se ha analizado en profundidad el uso de este material como absorbente acústico en la construcción empleando materiales constructivos como el yeso y el cemento. Por ello, el principal objetivo de este trabajo es estudiar los parámetros acústicos de una serie de materiales basados en WHS constituidos solo por WHS compactado o bien combinado con materiales constructivos (yeso o cemento) y otros aglutinantes o ligantes. Como objetivos secundarios se plantea investigar la influencia en el rendimiento acústico de: las dimensiones de las partículas de WHS, el método de preparación de las muestras, las dimensiones y composición de las muestras. El estudio de la absorción acústica se lleva a cabo mediante experimentos de laboratorio y utilizando el método normalizado de la función de transferencia (ISO 10534-2:1998) (ISO, 1998) mediante un tubo de impedancia tipo 4206 (Hottinger Brüel y Kjaer Ibérica), equipado con dos micrófonos de condensador de un cuarto de pulgada.

5.2. FUNDAMENTO TEÓRICO

5.2.1 ABSORCIÓN DEL SONIDO

5.2.1.1 El Sonido y su propagación

Según el Diccionario de la Real Academia Española, el *sonido* es una “vibración mecánica transmitida por un medio elástico, es decir, un medio en el cual las moléculas se mueven alrededor de su posición de equilibrio y trasladan la vibración a las adyacentes”. Así, el sonido se genera cuando un objeto o fuente sonora vibra, produciendo un movimiento oscilatorio que pasa de una molécula a otra a través de un medio, generalmente el aire (aunque podría ser cualquier otro), de forma esférica hacia el exterior del cuerpo en vibración, de manera que, posteriormente, sea susceptible de ser captado por el oído humano (Cuadrado-Méndez y Domínguez-López, 2019).

El sonido se puede producir a partir de diferentes fuentes, desde una persona hablando hasta un altavoz, que es una membrana móvil que comprime el aire generando ondas sonoras. En la [Figura 5.5](#) se presenta un esquema que simula cómo reaccionarían las moléculas de aire ante una vibración. En el primer estado, el sistema está en reposo. En el segundo, al pulsar la cuerda, se produce una vibración que empuja (y contrae (tercer estado) la primera molécula. En el momento del empuje, esta molécula golpea a la siguiente, provocando una reacción en cadena de empujes y contracciones. Esto es lo que crearía la onda sonora. Las moléculas solo oscilan un poco, pero no viajan en el espacio con la onda. A medida que baja la energía de la vibración, también decae el movimiento de las moléculas, es decir, que baja el volumen del sonido (Cuadrado-Méndez y Domínguez-López, 2019). En la parte de abajo de la imagen ([Figura 5.5](#)) vemos la representación gráfica de ese movimiento de vaivén que constituye una onda sonora simple.

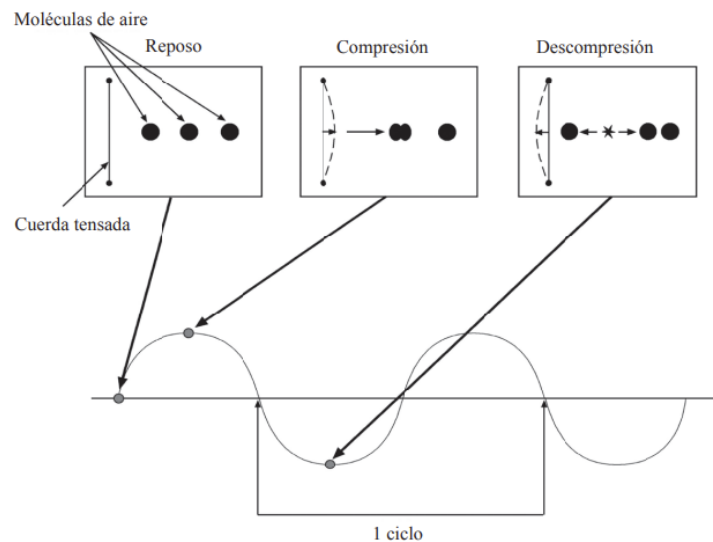


Figura 5.5. Movimiento vibratorio y onda sonora simple. Fuente: Cuadrado-Méndez y Domínguez-López (2019).

La *amplitud* de la onda sonora se define como la distancia entre el punto de reposo y el de mayor compresión o descompresión (ver [Figura 5.5](#)). Es decir, el lugar más alejado al que llega la molécula en desplazamiento desde su punto de origen (Cuadrado-Méndez y Domínguez-López, 2019). Normalmente, la amplitud de la onda se identifica con el concepto de *intensidad o volumen sonoro* (Cuadrado-Méndez y Domínguez-López, 2019). Debido al amplio margen de intensidades que el oído humano puede percibir (podemos oír volúmenes sonoros con relaciones de 1 a 10 000 000 o más), se utiliza para cuantificar a la intensidad sonora con una unidad de medida de carácter logarítmico: *el decibelio* (dB) (Cuadrado-Méndez y Domínguez-López, 2019). La amplitud de un sonido

no es necesariamente constante ya que puede variar en el tiempo. Por lo que se define la *envolvente de amplitud* de un sonido que es la forma que se obtiene uniendo las amplitudes de los ciclos sucesivos en el tiempo (Cuadrado-Méndez y Domínguez-López, 2019).

La velocidad de oscilación entre los dos estados de compresión y descompresión que provoca la fuente define la *frecuencia* de dicha onda (ver [Figura 5.5](#)) (Cuadrado-Méndez y Domínguez-López, 2019). La medición se suele efectuar en ciclos por segundo, o en hertzios (Hz) o kilohertzios (kHz), unidades que equivalen a un ciclo y a mil ciclos por segundo, respectivamente. El oído humano puede percibir sonidos cuyas frecuencias van desde 20 Hz a 16 kHz aproximadamente, aunque estos márgenes varían en función de la edad y el sexo, llegando en algunos casos a unos umbrales situados entre los 16 Hz y los 20 kHz (Hornsby y Ricketts, 2006). Este sería, dentro del conjunto de movimientos vibratorios que pueden transmitirse, el espectro de frecuencias audibles o audiofrecuencia. La frecuencia determina el tono de un sonido, siendo las frecuencias más bajas las que se corresponden con los sonidos graves y las frecuencias más altas las que se corresponden con los sonidos agudos. El rango de frecuencias de la voz humana y del sonido musical se sitúa principalmente entre 125 Hz y 3 kHz (Erickson et al., 2014).

Generalmente, las fuentes de ruido en edificación no son emisoras de una única frecuencia (tono puro) sino que generan sonidos que se componen de una combinación de ondas sonoras, a distintas frecuencias, y con distinto nivel de energía para cada una de ellas (Cuadrado-Méndez y Domínguez-López, 2019). Un *espectro sonoro* será, por tanto, la representación de los niveles de presión sonora en función de estas frecuencias, es decir, cómo se distribuye la energía de un sonido en función de las frecuencias que lo componen (Cuadrado-Méndez y Domínguez-López, 2019). El interés del análisis espectral reside en que el comportamiento acústico de los materiales y de los sistemas constructivos depende de la frecuencia, así como de la respuesta del oído humano (Cuadrado-Méndez y Domínguez-López, 2019). Así, en el análisis espectral se utilizan grupos de frecuencias de anchos normalizados: octavas o tercios de octava, normalmente (Cuadrado-Méndez y Domínguez-López, 2019). Posteriormente será posible caracterizar un ruido, un aislamiento, etc. mediante un único valor global en dB (Cuadrado-Méndez y Domínguez-López, 2019).

El sonido se propaga siempre por medios elásticos; es decir, en medios en los cuales las moléculas se mueven alrededor de su posición de equilibrio y trasladan la vibración a las adyacentes (Cuadrado-Méndez y Domínguez-López, 2019). Así, el sonido puede propagarse por medios sólidos, como una pared; líquidos, como el agua; o gaseosos, como el aire (López Jiménez y Moreno y Fuentes, 2013). En esta propagación,

tiene lugar un transporte de energía, pero no de materia (Cuadrado-Méndez y Domínguez-López, 2019). A diferencia de la luz y el resto de las ondas electromagnéticas, el sonido no se propaga en el vacío (Cuadrado-Méndez y Domínguez-López, 2019). En los materiales sólidos el sonido se propaga más rápido (a más de 2.500 m/s) que en líquidos como el agua (a unos 1.500 m/s) y mucho más rápido que en el aire (a 340 m/s) (Cuadrado-Méndez y Domínguez-López, 2019).

5.2.1.2 Disipación y Cambio de Medio

Según Carrascal García et al. (2016), cuando un sonido que se propaga en el aire se encuentra con un obstáculo compuesto por un determinado material, la energía sonora de la onda que incide en él se divide en otras tres:

- *Reflejada*: parte de la energía de la onda es devuelta por el material.
- *Transmitida*: parte de la energía de la onda atraviesa el material.
- *Absorbida*: parte de la energía de la onda es absorbida por el material.

Si referenciamos cada una de estas tres energías a la incidente se obtienen diferentes coeficientes. En concreto, el término *coeficiente de absorción acústica* se puede expresar como (Carrascal García et al., 2016):

$$\alpha = \frac{\text{Energía absorbida}}{\text{Energía incidente}} \quad [5.1]$$

Es decir, es la relación entre la energía sonora que incide en el material y la que es absorbida. El conocimiento de este coeficiente resulta indispensable para el diseño y la simulación acústica del campo sonoro en recintos ya que suele dar información sobre la eficacia acústica de un material (Carrascal García et al., 2016; Casas-Ledón et al., 2020). Este coeficiente depende del ángulo de incidencia del sonido directo (Crocker, 2007). El coeficiente de absorción acústica es distinto para cada frecuencia y viene dado normalmente en bandas de ancho de una octava con frecuencias centrales de 125 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2k Hz y 4 kHz o tercios de octava (Carrascal García et al., 2016). Las bandas de octava es el grupo de frecuencias comprendidas entre dos frecuencias f_1 y f_2 que cumplen (Carrascal García et al., 2016):

$$f_2 = 2 \cdot f_1 \text{ [Hz]} \quad [5.2]$$

La frecuencia central (Ec. 5.3) de esta banda cumplirá (Carrascal García et al., 2016):

$$f_c = \sqrt{f_1 \cdot f_2} \text{ [Hz]} \quad [5.3]$$

Normalmente, se utilizan las octavas que tienen como frecuencia central (Carrascal García et al., 2016):

125	250	500	1000	2000	4000	Hz
-----	-----	-----	------	------	------	----

En acústica arquitectónica, para aislamientos acústicos a ruido aéreo y a ruido de impactos, se suelen utilizar las bandas de octava de 125 a 4000 Hz (Carrascal García et al., 2016). En los recintos, el sonido se propaga en forma de ondas en todas direcciones que rebotan en todas las superficies produciéndose numerosas reflexiones (Carrascal García et al., 2016). Las reflexiones producen un nivel sonoro suplementario que se suma al principal, por lo que el sonido recibido aumenta, llegando a veces a ser molesto. Este fenómeno de persistencia de la energía sonora en el espacio, incluso una vez que cesa la fuente que la produce, se conoce como *reverberación*. Se mide por medio del TR, descrito en el apartado 5.1. de la Introducción. Este parámetro es el tiempo que se requiere en un espacio cerrado para que un sonido en una frecuencia determinada disminuya 60 dB, después de haber cesado la fuente o bien, el tiempo que transcurre hasta que la densidad de la energía acústica en el recinto decrece una millonésima de su valor inicial. El proceso de decaimiento de la energía es diferente para cada posición dentro del recinto y, además, varía con la frecuencia. Es habitual calcular el TR (Ec. 5.4) mediante ecuaciones basadas en la teoría estadística; de ellas, la más conocida y empleada es la fórmula de Sabine (Carrascal García et al., 2016; Crocker, 2007):

$$TR = 0,16 \cdot \frac{V}{A} \text{ (s)} \quad [5.4]$$

donde vemos que el TR, en segundos, depende del volumen del recinto (V en m^3) y el área de absorción acústica equivalente (A en m^2).

Según Carrascal García et al. (2016), la *absorción acústica* es la disminución de la energía acústica en un recinto, que se disipa en energía calorífica, al ser absorbida por el medio que atraviesa. Esta pérdida de energía se debe a la absorción debida al aire, a los materiales y acabados empleados en los elementos constructivos, caracterizados por un coeficiente de absorción, a los objetos y mobiliario presentes en el recinto y a las personas que se encuentren dentro de la sala. Para calcular el área de absorción acústica de un recinto es necesario sumar la absorción que aporta cada una de las superficies de distinto material del recinto, así como los objetos o mobiliario que pudiera contener y la

absorción del aire. La absorción de una superficie (Ec. 5.5) se obtiene multiplicando su coeficiente de absorción por su superficie:

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot S_i \quad [5.5]$$

donde α_i es el coeficiente de absorción acústica de cada paramento en bandas de frecuencia y S_i es área de paramento cuyo coeficiente de absorción es α_i (m²).

5.2.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES ABSORBENTES SONOROS

Existen varios tipos de materiales absorbentes sonoros disponibles comercialmente (Arenas y Crocker, 2010; Crocker, 2007). Los tipos principales de materiales absorbentes están en consonancia con los procesos y mecanismos de degradación de la energía acústica y pueden clasificarse como se indica en la [Tabla 5.1](#) (López Jiménez y Moreno y Fuentes, 2013).

Tabla 5.1. Clasificación de los materiales absorbentes sonoros comerciales.

Porosos	Esqueleto rígido		
	Esqueleto flexible		
Resonadores	Simples	de Helmholtz	
		de membrana	membranas propias
			tipo Békési
	Acoplados	en serie	
en paralelo: paneles perforados			
Mixtos	son una combinación de los anteriores y constituyen la mayor parte de los materiales comerciales		
Anecoicos	de variación gradual de las características por variación real o por configuración geométrica		

Fuente: López Jiménez y Moreno y Fuentes (2013).

Tal vez los más típicos, de entre los considerados en la [Tabla 5.1](#), son los materiales porosos, siendo realmente los demás, “dispositivos absorbentes” (López Jiménez y Moreno y Fuentes, 2013). Estos materiales porosos están constituidos por un medio sólido (esqueleto) recorrido por cavidades más o menos tortuosas (poros) comunicadas con el exterior. La degradación de la energía acústica se produce por fricción viscosa del fluido en el seno de las cavidades, cuya superficie alcanza en estos medios una proporción preponderante frente al volumen. No son materiales acústicos absorbentes los materiales porosos sin intercomunicación entre cavidades ni con el exterior (materiales de celdillas cerradas). La [Figura 5.6](#) muestra una sección transversal esquemática de un material sólido poroso (Arenas y Crocker, 2010). Los poros que están

totalmente aislados de sus vecinos se denominan poros “cerrados”. Tienen un efecto sobre algunas propiedades macroscópicas del material, como su densidad aparente, su resistencia mecánica y su conductividad térmica. Sin embargo, los poros cerrados son sustancialmente menos eficientes que los poros abiertos a la hora de absorber la energía sonora. Por otro lado, los poros “abiertos” tienen un canal continuo de comunicación con la superficie externa del cuerpo, y tienen gran influencia en la absorción del sonido. Los poros abiertos también pueden ser “ciegos” (abiertos sólo por un extremo) o “pasantes” (abiertos por dos extremos). Además, existe una convención práctica que se utiliza para distinguir entre porosidad y rugosidad, y que supone que una superficie rugosa no es porosa a menos que tenga irregularidades más profundas que anchas.

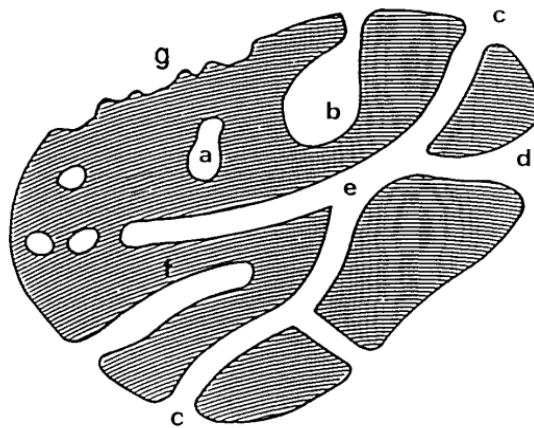


Figura 5.6. Sección transversal esquemática de un sólido poroso: a) poro cerrado; b), c), d), e) y f) poros abiertos; b) y f) poros ciegos (abiertos por un lado solo); g) rugosidad. Fuente: Wang y Yang (2004).

En la [Figura 5.7](#) aparecen los esquemas constitutivos principales de los materiales porosos anteriores y las curvas de absorción típicas (Crocker, 2007). Normalmente, la absorción del sonido de los materiales porosos es muy pequeña a bajas frecuencias y aumenta hasta alcanzar valores máximos en la parte alta del espectro. Desde el punto de vista del comportamiento acústico conviene distinguir entre materiales porosos de esqueleto rígido y flexible. En los primeros, el coeficiente de absorción aumenta con la frecuencia (ver [Figura 5.7](#)) siendo absorbentes preferentes de frecuencias altas, mientras que los segundos presentan resonancias de absorción a frecuencias altas y medias. Los demás dispositivos absorbentes (resonadores) extraen la energía sonora a una determinada frecuencia, normalmente baja (inferior a los 500 Hz).

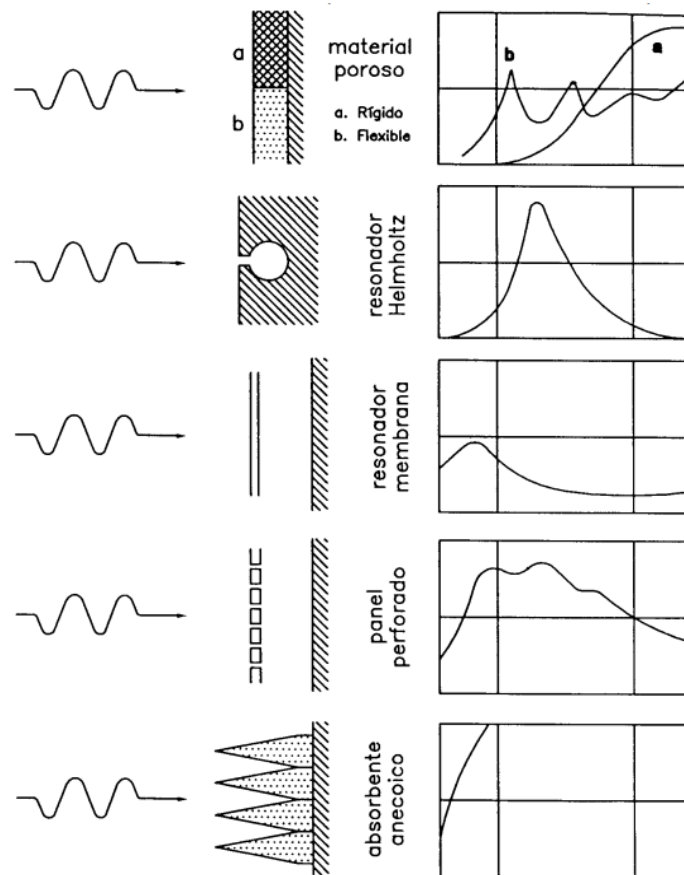


Figura 5.7. Principales absorbentes acústicos y curvas de absorción típicas (α frente a frecuencia). Fuente: Crocker (2007).

Los principales factores que pueden influir en el rendimiento acústico de materiales fonoabsorbentes obtenidos a partir de fibra natural son el tamaño de las fibras, la resistividad del flujo de aire, la porosidad, la tortuosidad, el espesor de la muestra, la densidad, el grado de compactación, la impedancia superficial o la colocación y posición del material fonoabsorbente (Koizumi et al., 2002; Samsudin et al., 2016; Seddeq, 2009). La rugosidad del material debida a posibles irregularidades superficiales también puede producir efectos de difracción de la onda sonora incidente mejorando la absorción acústica pues una superficie más áspera aumentaría la interacción de las ondas de sonido (Guna et al., 2021a, 2021b; Kinsler et al., 2006).

En general, al aumentar la porosidad del material se incrementa la absorción del sonido en todas las frecuencias ya que la penetración de la onda sonora incidente es mayor a medida que se incrementa el grado de porosidad. La [Figura 5.8](#) muestra la evolución del coeficiente de absorción en función de la frecuencia de un mismo material con tres grados de porosidad diferentes.

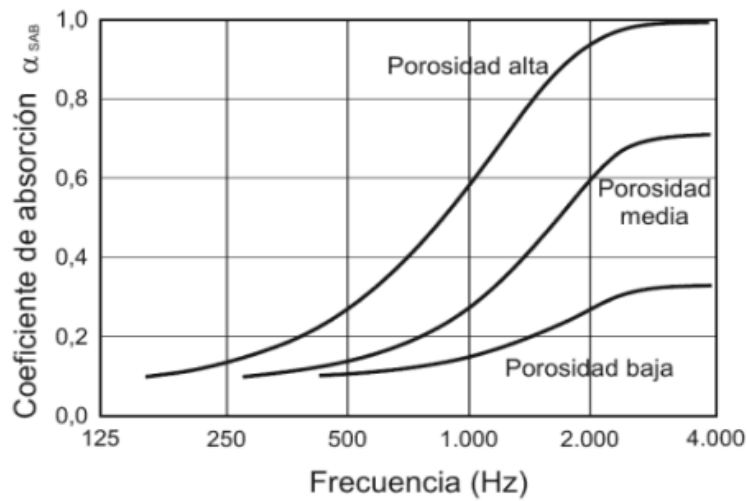


Figura 5.8. Variación de la absorción acústica con la porosidad. Fuente: Carrión (1998).

Para dimensiones de unos pocos centímetros, los absorbentes porosos son más efectivos en el área de las medias y altas de frecuencia. Se pueden utilizar espesores más elevados en cuyo caso la absorción del sonido es mayor a bajas frecuencias. En la [Figura 5.9](#) se muestra la variación de la absorción en función de la frecuencia para diferentes espesores de un material absorbente comercial a base de lana de vidrio (Carrión, 1998).

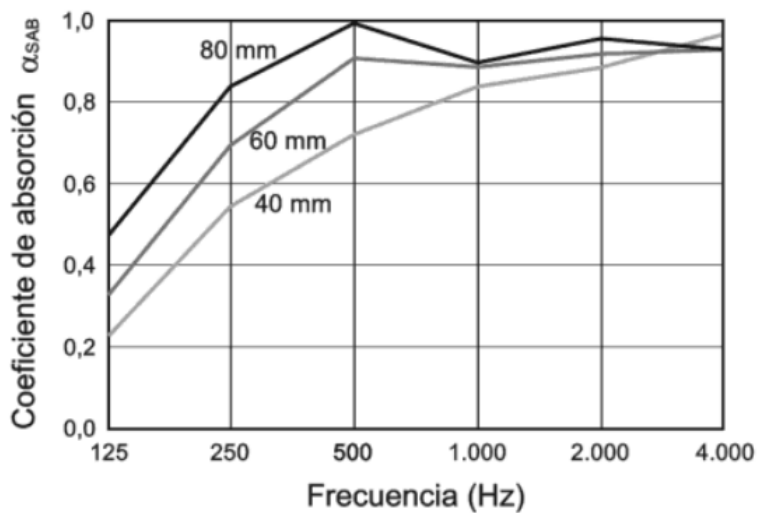


Figura 5.9. Variación de la absorción acústica con el espesor del material. Fuente: Carrión (1998).

5.2.3 MEDIDA DE LA ABSORCIÓN ACÚSTICA CON EL MÉTODO TUBO DE IMPEDANCIA

La determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia mediante el método de la función de transferencia está

establecida por la Norma UNE-EN-ISO 10534-2:2002 (ISO, 1998). Según esta normativa: el dispositivo de medida (*tubo de Kundt*) está provisto en un extremo de una fuente acústica o altavoz, el cual produce ondas sonoras que viajan dentro del tubo y son reflejadas por la muestra de prueba en el tubo.

En la [Figura 5.10](#) se muestra un esquema del tubo de impedancia. La muestra de ensayo se coloca en uno de los extremos de un tubo de impedancia recto, rígido, liso y estanco (1). Se generan ondas planas en el tubo mediante una fuente sonora (4) (aleatoria, de secuencia pseudo-aleatoria, de trinos), y se miden las presiones acústicas en dos posiciones cercanas a la muestra (x y $x-s$). Se determina la *función de transferencia acústica compleja* de las señales en los dos micrófonos (2 y 3), que se usa para calcular el coeficiente de reflexión complejo para incidencia normal, el coeficiente de absorción para incidencia normal, y la impedancia normalizada del material en ensayo.

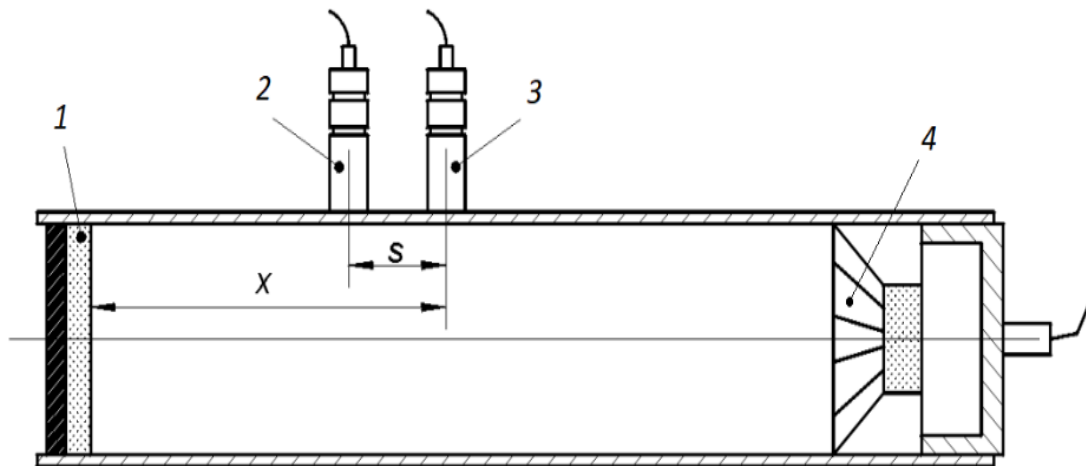


Figura 5.10. Esquema de tubo de impedancia: 1) portamuestras; 2 y 3) micrófonos; 4) fuente acústica. Imagen adaptada de UNE-EN-ISO 10534-2:2002.

Las magnitudes se determinan como funciones de frecuencia, con una resolución en frecuencia condicionada por la frecuencia de muestreo y la longitud de la señal del sistema digital de análisis de frecuencia usado para las mediciones (ISO, 1998). El rango de frecuencia útil depende del ancho del tubo y de la distancia entre las dos posiciones microfónicas (s). Se puede obtener un rango de frecuencia extendido combinando las mediciones con diferentes anchos y espaciados. Las mediciones se pueden realizar de dos formas distintas: mediante el método de los dos micrófonos (empleando dos micrófonos en posiciones fijas) o el método de un micrófono (usando un micrófono sucesivamente en dos posiciones).

5.3.2.1 Definición del Coeficiente de Absorción

Para definir el comportamiento de una onda acústica en un material se parte de dos ecuaciones fundamentales (Álvarez Láinez, 2007), la ecuación de continuidad (Ec. 5.6) y la ecuación de movimiento (Ec. 5.7):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \rho \nabla v \quad [5.6]$$

$$-\nabla P = \rho \frac{\partial v}{\partial t} \quad [5.7]$$

donde P es la presión sonora, v la velocidad de la partícula y ρ la densidad del fluido. De la combinación de estas dos ecuaciones con la ecuación de estado ($P = \rho_0 \cdot C^2 \cdot \theta = \beta \cdot \theta$, siendo β el módulo volumétrico y $\theta = \frac{P - P_0}{\rho_0}$ el factor de condensación), se obtiene la ecuación de onda (Ec.5.8):

$$-\nabla^2 P = \frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \quad [5.8]$$

en la cual $C = \sqrt{\frac{\beta}{\rho_0}}$, siendo ρ_0 la densidad del aire y $\beta = \rho_0 \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)$.

La solución de esta ecuación para una propagación en el eje x , supuesta una onda incidente que se desplaza en la dirección positiva del eje x y una reflejada que se desplaza en la dirección negativa del eje x , es:

$$P(x) = A e^{j(\omega t + \kappa x)} + B e^{j(\omega t - \kappa x)} \quad [5.9]$$

donde A y B representan la amplitud de la onda incidente y reflejada, $\omega = 2\pi H$, H es la frecuencia en Hz y κ es la constante de propagación. Si en la Ec. 5.9 se elimina la componente temporal $e^{j\omega t}$, se tiene:

$$P(x) = A e^{j(\kappa x)} + B e^{-j(\kappa x)} \quad [5.10]$$

Por otra parte, se define la impedancia acústica específica Z_c de un material como el cociente de la presión sonora $P(x)$ y la velocidad $v(x)$ en cada punto del mismo:

$$Z_c = \frac{P(x)}{v(x)} \quad [5.11]$$

De las Ecs. 5.10 y 5.11 se deduce que la *velocidad específica del aire* que se encuentra dentro del material poroso viene dada por:

$$v(x) = \frac{Ae^{j(\kappa x)}}{Z_c} - \frac{Be^{-j(\kappa x)}}{Z_c} \quad [5.12]$$

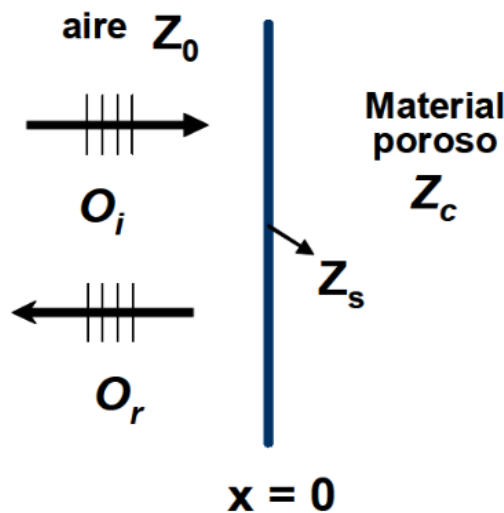


Figura 5.11. Propagación de una onda sonora al incidir sobre un material poroso.

Fuente: Álvarez Láinez (2007).

Cuando la onda incidente llega desde el aire (ver [Figura 5.11](#)) se tiene que $Z_s = P(0)/v(0)$ y utilizando las Ecs. 5.11 y 5.12 se puede demostrar que Hilyard y Cunningham (1994):

$$\frac{B}{A} = \left(\frac{Z_s - Z_0}{Z_0 + Z_s} \right) \quad [5.13]$$

donde $Z_0 = \rho_0 c_0$ es la impedancia característica del aire, siendo ρ_0 la densidad del aire y c_0 la velocidad del sonido en el aire. El coeficiente de reflexión R , se define como la relación de amplitud entre la onda incidente y la reflejada $R = B/A$. A partir de este coeficiente se puede definir el coeficiente de absorción (α) como:

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad [5.14]$$

Reemplazando el valor de $|R|^2$ se tiene la ecuación que define el coeficiente de absorción, cuyo valor oscila entre 0 y 1 (Kinsler et al., 2006; Seybert, 1980):

$$\alpha = 1 - \left| \frac{Z_s - Z_0}{Z_0 + Z_s} \right| \quad [5.15]$$

La Ec. 5.15 nos indica que para que exista una mejor absorción es necesario que la impedancia superficial que encuentra la onda sonora en el momento de propagarse sea lo menor posible y lo más parecida a la impedancia del aire.

5.3.2.2 Método Normalizado de la Función de Transferencia

Para la determinación del coeficiente de absorción, el equipo de medida que se ha empleado en este estudio utiliza el método de cálculo que se explica a continuación (Álvarez Láinez, 2007). A este método se le conoce como *método de la función de transferencia*. Inicialmente, se escriben las ecuaciones de la presión de las ondas incidentes, P_I (Ec.5.16), y reflejada, P_R (Ec. 5.17) de la siguiente forma:

$$P_I(x, t) = A \cdot e^{j(\omega t - kx)} \quad [5.16]$$

$$P_R(x, t) = B \cdot e^{j(\omega t + kx)} \quad [5.17]$$

donde A es un coeficiente de amplitud máxima de la onda, ω es la frecuencia angular de dicha onda, k es el *número de onda* y finalmente t y x son las variables tiempo y posición respectivamente, de las que depende la presión sonora.

La superposición de ambas ondas creará un frente de ondas estacionarias cuyas componentes (incidentes, i , y la reflejada, r) son estudiadas en un analizador de espectro de doble canal (es donde los micrófonos vuelcan la información recibida) el cual determina tres funciones de frecuencia (factores de fase). La onda incidente que viaja en el interior del tubo posee un factor de fase de la forma $H_i = e^{-jkx}$ y será detectado en el segundo micrófono. Por otra parte, la onda reflejada, que viaja en sentido opuesto, tendrá como termino de fase $H_r = e^{+jkx}$. Este término será recogido por el primer micrófono. Igualmente se analiza la función de transferencia del primer micrófono al segundo:

$$H_{12} = \frac{S_{11}}{S_{12}} \quad [5.18]$$

donde S_{12} es el espectro cruzado de potencia del segundo canal 2 al primero, y S_{11} el espectro de potencia del primer canal (Seybert, 1980). Chung y Blaser (1980) demuestran que el coeficiente de reflexión complejo viene dado por:

$$R = \left(\frac{H_{12} - H_i}{H_r - H_{12}} \right) e^{j2k(l-s)} \quad [5.19]$$

donde s es la distancia entre micrófonos, $l = x - s$ es la distancia que hay desde el micrófono más cercano a la muestra (ver [Figura 5.11](#)) y k la constante de propagación. A partir de este valor el coeficiente de absorción (α) y la impedancia normalizada con la impedancia del aire, se definen respectivamente como muestra la Ec. 5.20:

$$\frac{Z_s}{\rho_0 c_0} = \frac{1+R}{1-R} \quad [5.20]$$

Debido a que la función de transferencia se calcula a partir del espectro cruzado entre los dos micrófonos cualquier mal ajuste entre estos podría causar errores en la medida (Álvarez Láinez, 2007). Por ello, es necesario realizar previamente una calibración del tubo para obtener la función de transferencia (H_{12}). Esta calibración se realiza intercambiando los micrófonos de modo que la media de estos dos valores sirva de referencia a las siguientes medidas. Una vez se ha calibrado el equipo, la medida se inicia con la señal aleatoria generada en el analizador, la cual es amplificada y aplicada a una fuente sonora. Posteriormente, el analizador mide la respuesta de los dos micrófonos y calcula H_{12} . A partir de este resultado, se obtiene el valor del coeficiente de absorción, de reflexión y la impedancia del material normalizada. Finalmente, el software registra en pantalla estos valores, además de la impedancia normalizada.

5.3. MATERIALES Y MÉTODOS

En este apartado se describen los materiales y métodos experimentales utilizados en este estudio. Primero se indican las muestras consideradas, indicando sus nombres y características principales y, seguidamente, se detalla el método utilizado en la caracterización acústica de las muestras anteriormente mencionadas.

5.3.1. MATERIALES

Los materiales estudiados en esta sección fueron, por un lado, aquellos preparados sólo con WHS bajo diferentes condiciones: tamaño de partícula de WHS, grado de compactación, espesor de la muestra o la adición de un ligante extra. La nomenclatura general utilizada para estas muestras ha sido WHS-X-100-M-Y-Z, siendo X el tamaño de partícula (tp) de WHS utilizado (A: $tp < 0,5$ mm; B: $0,5 < tp < 1$ mm; o C: $1 < tp < 2$ mm), M el material ligante empleado (sin etiqueta: no lleva ligante, ALMIDÓN:

almidón de maíz, COLA: cola blanca), Y es la carga aplicada durante la compactación de la muestra (sin etiqueta: compactación manual, 1T: compactación controlada a 1 t o 2T: compactación controlada a 2 t) y Z el espesor de la muestra (sin etiqueta, E1 o E2 según el valor). El número 100 hace referencia a que se ha empleado solo WHS sin ningún tipo de aglutinante o material extra. Por ejemplo, la muestra WHS-B-100-1T sería una muestra preparada con partículas de WHS con un tamaño comprendido entre 0,5 y 1 mm, compactada con prensa hidráulica a 1 t y con el espesor mayor de esta muestra indicado en el apartado 5.4.1 (ver [Tabla 5.6](#)). Y la WHS-B-100-ALMIDÓN sería una muestra preparada mezclando WHS de tamaño promedio entre 0,5 y 1 mm con almidón de maíz disuelto en agua y empleando compactación manual con el espesor indicado en el apartado 5.4.1 ([Tabla 5.7](#)).

Por otro lado, se han analizado con detalle las propiedades acústicas de materiales compuestos de yeso y WHS. En el Capítulo 3 de la presente tesis doctoral se detalla todo el proceso de acondicionamiento del material de partida y la preparación estas muestras. En este caso, se ha analizado la influencia en las propiedades acústicas de los materiales preparados del tamaño de partícula de WHS, la cantidad de WHS en la muestra, el grado de compactación y el espesor de la muestra. La nomenclatura general utilizada para estas muestras ha sido WHS-X-C-Y-Z, siendo X el tamaño de partícula (tp) de WHS utilizado (A: $tp < 0,5$ mm; B: $0,5 < tp < 1$ mm; o C: $1 < tp < 2$ mm), C la cantidad de WHS en la muestra (1 para una proporción en peso WHS:yeso de 1:99, 5 para 1:19, 10 para 1:9, 20 para 1:4, 30 para 3:7 o 50 para 1:1), Y la carga aplicada durante la compactación de la muestra (sin etiqueta: compactación manual; 1T: compactación controlada a 1 t; y 2T: compactación controlada a 2 t) y Z el espesor de la muestra (sin etiqueta, E1 o E2 según el valor). Por ejemplo, la muestra WHS-B-30-1T sería una muestra preparada con un tamaño de WHS comprendido entre 0,5 a 1 mm, una proporción en peso WHS:yeso de 3:7 mediante una compactación en prensa hidráulica a una 1 t y el mayor espesor para esta serie como aparece indicado más adelante en el apartado 5.4.2 en las [Tablas 5.9](#), [5.10](#) y [5.11](#).

Finalmente se han considerado varias muestras a base de WHS con un tamaño de partícula de 0,5 a 1 mm combinado con otros materiales constructivos (cemento y resina epoxi), compactadas todas ellas de forma manual. La nomenclatura elegida para los materiales combinados de WHS con cemento y resina epoxi es: WHS-B-C-M, siendo C la cantidad de WHS en la muestra con respecto al material con el que se mezcla (10 para 1:9 o 50 para 1:1) y M es el material (cemento o resina). La letra B hace referencia al tamaño de partícula empleado, que en este caso también es de 0,5 a 1 mm en todas las muestras. Por ejemplo, la muestra WHS-B-50-CEMENTO sería una muestra preparada con WHS de tamaño promedio entre 0,5 y 1 mm y cemento en una proporción WHS:

cemento de 1:1 mediante compactación manual y con el espesor indicado en el apartado 5.4.3 (Tabla 5.12). Además, se prepararon otras muestras a partir de las anteriores variando el espesor. En la Tabla 5.2 se resumen las características y nomenclaturas de dichas muestras, junto con las condiciones de preparación no recogidas en el Capítulo 2.

Tabla 5.2. Nomenclaturas y condiciones de preparación de las muestras.

Muestra	Tamaño de partícula (mm)	Proporción WHS:aglutinante (% en peso)	Compactación del material (t)
G-E2	0,1-1	0:1	Manual
WHS-A-100-1T-E2	< 0,5	1:0	1
WHS-A-100-1T-E3			1
WHS-B-100-E2	0,5 - 1		Manual
WHS-B-1-E2	0,5 - 1	1:99	Manual
WHS-B-1-E3		1:99	
WHS-B-5-E2		1:19	
WHS-B-10-E2		1:9	
WHS-B-10-E3		1:9	
WHS-B-20-E2		1:4	
WHS-B-20-E3		1:4	
WHS-B-30-E2		3:7	
WHS-B-50-E2		1:1	

5.3.2. INSTRUMENTACIÓN DE MEDIDA

La caracterización acústica de las distintas muestras se obtuvo mediante un tubo de impedancia colocado horizontalmente (tipo 4206, Hottinger Brüel y Kjaer Ibérica, Nærum, Dinamarca) (ver Figura 5.12), equipado con dos micrófonos de condensador de un cuarto de pulgada (Tipo 4187, Hottinger Brüel y Kjaer Ibérica). Las señales se analizaron con un sistema portátil PULSE de Brüel and Kjaer con cuatro canales de datos de entrada (tipo 3560-C, Nærum, Dinamarca). Se utilizó un portamuestras con diámetro de 29 mm (válidos en el rango de frecuencias de 500 Hz a 6400 Hz). Aunque el rango de trabajo del tubo de impedancia con este diámetro es de 500 a 6400 Hz, en este trabajo se pudo ampliar el rango de medida hasta los 50 Hz dado que se apreciaba gran estabilidad y que se facilitaba, además, el cálculo de α_w y NRC.

Debido al método de preparación por compactación en un molde, las muestras preparadas presentan distinto acabado superficial en cada cara. De esta forma, la parte de la muestra en contacto con el fondo del molde presentaba siempre un acabado más liso mientras que la parte en contacto con el pistón por donde se ejercía la presión, quedaba siempre más rugosa por el acabado final a la que esta era sometida para eliminar la rebaba que se producía en los bordes de la muestra. Por ello, para realizar la medición en el tubo de impedancia, la cara lisa de la muestra fue colocada siempre hacia

abajo en contacto con la pared inferior del portamuestras. De esta forma, la cara rugosa era la que quedaba expuesta siempre a la incidencia de las ondas. Se eligió esta disposición, principalmente, para minimizar todo lo posible una zona de aire entre la pared del portamuestras y la muestra. Ya que, si se colocaba la cara rugosa de la muestra en contacto con la base del portamuestras, el contacto con la pared solo sería parcial y la zona creada de aire podría originar un aumento de la absorción de sonido a baja frecuencia. Por otro lado, que la cara donde incide el sonido sea la más rugosa de la muestra podría favorecer su absorción (Guna et al., 2021a, 2021b; Kinsler et al., 2006).

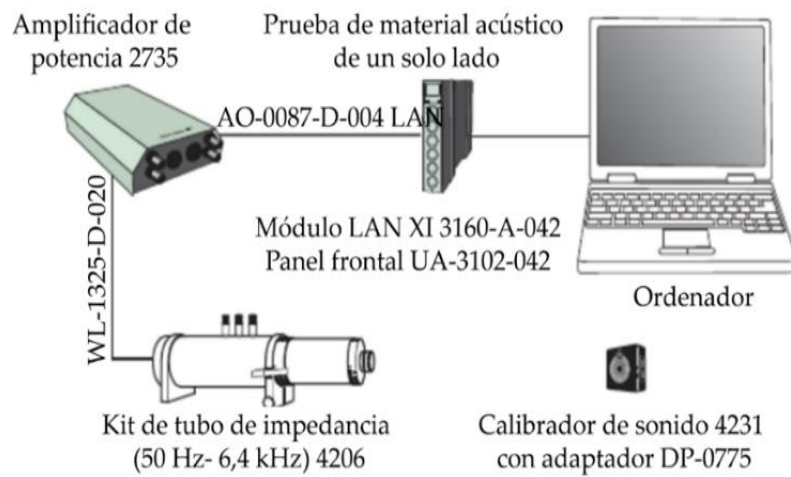


Figura 5.12. Disposición horizontal (abajo) del tubo de impedancia) y configuración del sistema (arriba) utilizados en la caracterización acústica de las muestras de este trabajo.

Los coeficientes de absorción acústica de las diferentes muestras se determinaron utilizando el tubo de impedancia siguiendo el método de la función de transferencia de dos micrófonos descrito en la norma UNE-EN-ISO 10534-2:2002 (ISO, 1998). A partir de la medición de la absorción acústica en el tubo de impedancia, además de obtener el coeficiente de absorción acústica, se pueden obtener también el *coeficiente de reducción*

acústica, NRC (por sus siglas en inglés, *noise reduction coefficient*) y el coeficiente de absorción sonora ponderado, α_w .

Siguiendo la norma ASTM C423-17, para una muestra específica, este parámetro se determina como la media aritmética de los coeficientes de absorción acústica en las frecuencias centrales de la banda de octava de 250, 500, 1000 y 2000 Hz, a través de los valores obtenidos mediante el tubo de impedancia. El valor obtenido se redondea al múltiplo más cercano de 0,05. En concreto, el NRC en este trabajo se calculó mediante la expresión (Ec. 5.21):

$$NCR = \frac{\alpha_{250} + \alpha_{500} + \alpha_{1000} + \alpha_{2000}}{4} \quad [5.21]$$

El coeficiente de absorción acústica ponderado, α_w , resume el rendimiento global del material en términos de absorción acústica y se determina de acuerdo con la norma EN ISO 11654 (ISO, 1997). Las clases de absorción A-E se describen en dicha norma (ver [Tabla 5.3](#)).

Tabla 5.3. Clases de absorción acústica según el α_w .

Clase de absorción acústica	α_w
A	0,9; 0,95; 1,00
B	0,8; 0,85
C	0,60; 0,65; 0,70; 0,75
D	0,30; 0,35; 0,40; 0,50; 0,55
E	0,25; 0,20; 0,15
Sin clasificar	0,10; 0,05; 0,00

Fuente: EN ISO 11654

Tanto el NRC como el α_w son indicadores del porcentaje de energía absorbida por el material. De manera que estos valores permiten evaluar en conjunto la capacidad de absorción acústica de un material. La principal diferencia entre el NRC y el coeficiente de absorción sonora se basa en que este último otorga diferente importancia a las distintas frecuencias, pues el oído humano no reacciona igual a todas las frecuencias. Además, el NRC no tiene en cuenta las altas frecuencias, mientras que el α_w sí tiene en cuenta altas frecuencias (4 kHz), si bien el peso dado a 250 Hz y 4 kHz es inferior que al resto. Por ello, el α_w representa mejor cómo el oído humano percibe el sonido.

5.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.4.1. MUESTRAS PREPARADAS ÚNICAMENTE CON WHS

En este apartado se muestran y discuten los resultados obtenidos al medir las propiedades acústicas de las muestras preparadas solo con WHS. Se estudia la influencia sobre estas propiedades del tamaño de partícula de WHS, el grado de compactación durante la preparación de las muestras, el espesor de la muestra obtenida y la presencia de un ligante extra.

5.4.1.1. Estudio de la Influencia del Tamaño de Partícula del WHS y el Grado de Compactación

En este apartado se analiza la influencia del tamaño de partícula [$< 0,5$ mm (A), de $0,5$ a 1 mm (B), y de 1 a 2 mm (C)] en las propiedades acústicas del material obtenido empleando diferentes grados de compactación (M, 1 t y 2 t). El espesor medio de estas muestras ha sido de 14 mm. En la [Figura 5.13](#) se representa el coeficiente de absorción del sonido de las muestras preparadas.

En línea con los resultados anteriores, se obtiene un bajo coeficiente de absorción para densidades elevadas (muestras preparadas con 1 y 2 t) que puede explicarse por la baja porosidad y disminución del tamaño de los poros como resultado de la alta presión de compactación aplicada. De hecho, el perfil de las curvas obtenidas para las muestras compactadas de forma manual (ver [Figura 5.13](#) a) ha resultado ser bastante parecido al que se atribuye a los materiales porosos de esqueleto flexible donde hay una significativa absorción a bajas frecuencias ([Figura 5.7](#)). Mientras que el observado para las muestras preparadas con carga controlada a 1 y 2 t ([Figuras 5.13](#) b y c) parece ser más cercano al exhibido por un sólido poroso de esqueleto rígido en las que la absorción es significativamente baja a menores frecuencias, ésta aumenta progresivamente a medias y altas frecuencias, alcanzando un valor máximo en las frecuencias más altas (4 kHz).

En la [Figura 5.14](#), se incluyen las imágenes de dos de estas muestras, una preparada con compactación manual y otra con 1 t. Como se evidencia las primeras resultaron ser menos rígidas y densas que las preparadas con carga controlada a 1 t.

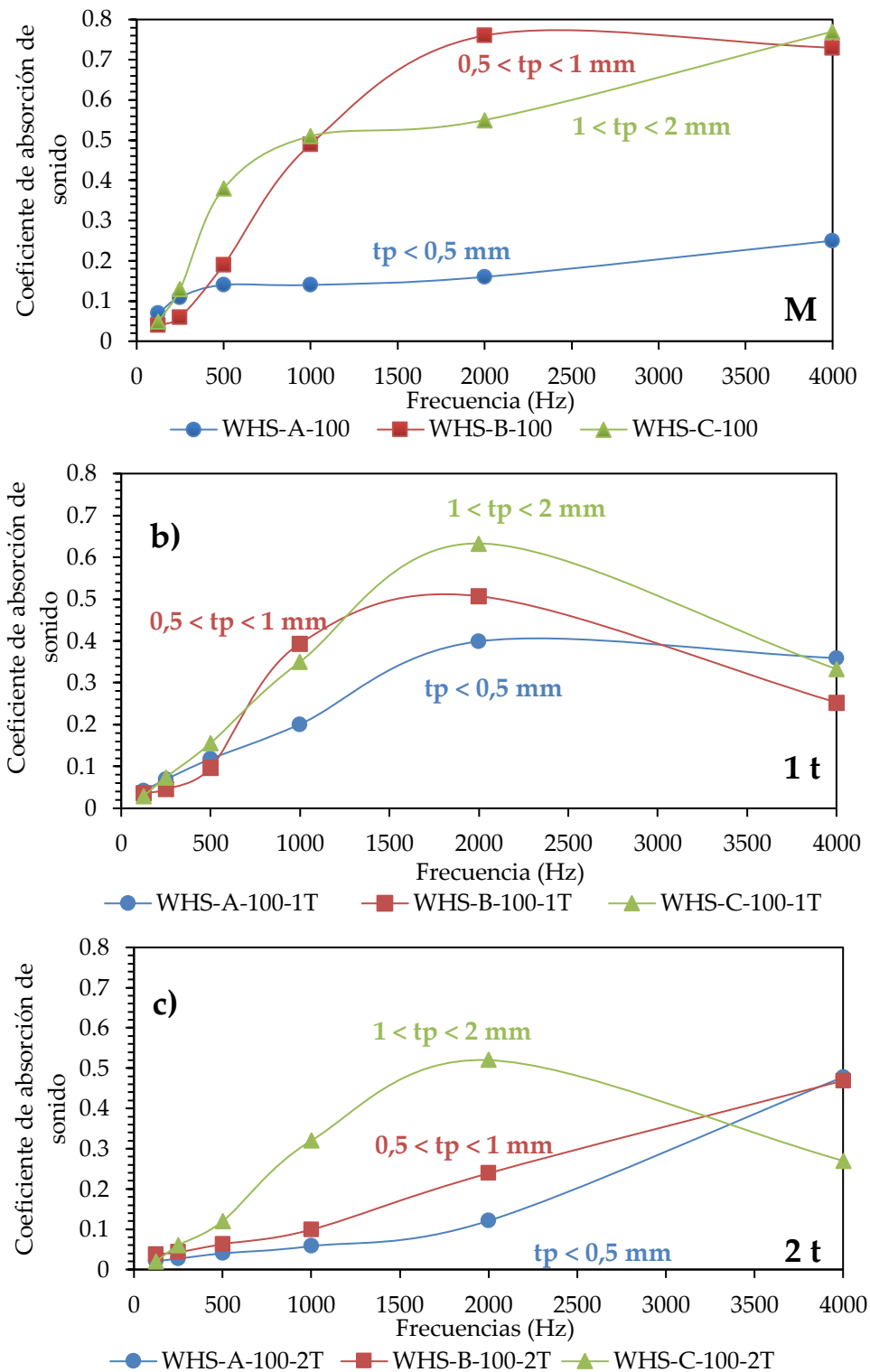


Figura 5.13. Coeficiente de absorción de sonido de las muestras con tamaño de partícula A (<0,5 mm), B (0,5 < tp < 1 mm) y C (1 < tp < 2 mm), preparadas con diferentes cargas durante la compactación: a) prensado manual (M), b) 1 T y c) 2 T con el mismo espesor de muestra (14 mm).

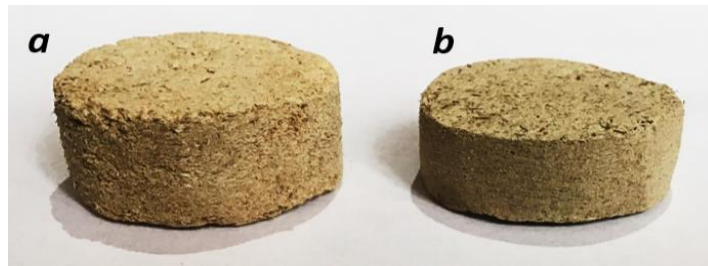


Figura 5.14. Muestra WHS-A-100: a) compactada manualmente y b) compactada a 1 t.

Kinnane et al. (2016) analizaron también las características de absorción sonora de viruta de cáñamo suelta (sin aglutinante) para diferentes grados de compactación. En sus investigaciones observaron que el incremento de la carga de compactación también aumentaba la densidad y modificaba la distribución del tamaño de los poros desplazando la curva de absorción acústica hacia las frecuencias bajas. En nuestro caso, también se observa el desplazamiento del máximo del coeficiente de absorción acústica a menores frecuencias al aumentar el grado de compactación. Si bien este efecto es más evidente para tamaños de partícula de WHS inferiores a 0,5 mm. Esto hace pensar que, por un lado, las muestras con menor tamaño de partícula (A) favorecen la agregación de las partículas minimizando los espacios interparticulares independientemente de la carga de compactación. Por otro lado, las muestras de mayor tamaño (C) impiden, en las mismas condiciones, la compactación de las partículas originando mayor porosidad que favorece la absorción acústica.

En cuanto a la influencia del tamaño de partícula, se observa mayor absorción a medida que aumenta el tamaño de partícula WHS en casi todo el rango de frecuencias, independientemente de la carga de compactación aplicada. Solo en el caso de la compactación controlada a 1 y 2 t, y en torno a los 4 kHz, las muestras preparadas con menor tamaño de partícula mostraron similar coeficiente de absorción acústica que las preparadas con mayor tamaño de partícula. Ferrandez-García et al. (2020) observaron, al igual que los resultados encontrados en este trabajo, que cuanto mayor era el tamaño de las partículas, mayores eran los coeficientes de absorción acústica.

En la [Tabla 5.4](#) se comparan los coeficientes de absorción obtenidos en esta investigación con los alcanzados con otros materiales preparados a partir de otras biomásas o materiales comerciales que han sido publicados por otros autores en el mismo rango de frecuencias (0,05 - 6,4 kHz). Si comparamos los valores indicados en la [Tabla 5.4](#), en la que se han considerado materiales preparados sin aglutinante y caracterizados con el mismo método siguiendo la norma ISO 10534-2 (ISO, 1998), se puede concluir que las muestras preparadas con WHS mediante compactación manual han mostrado un rendimiento acústico muy similar al conseguido con otras biomásas

que en la mayoría de los casos presentaron un espesor de muestra superior al del presente estudio. En concreto, el máximo de absorción alcanzado por las muestras a base de WHS es incluso superior al de la paja de trigo (Iannace, 2017), que además tiene un espesor de muestra casi cuatro veces mayor al de la muestra de WHS, o al corcho (Gumanová et al., 2022), con un espesor de muestra ligeramente superior. También se observa que las muestras preparadas con WHS han presentado valores de absorción similares a los obtenidos por los materiales comerciales. El máximo coeficiente de absorción obtenido con las muestras a base de WHS supera significativamente el máximo de absorción publicado para una muestra de espuma de poliuretano (PUR) y es solo ligeramente inferior al máximo coeficiente de absorción obtenido para la muestra de lana mineral, un material muy empleado en construcción.

En la [Tabla 5.5](#) se muestran los valores NRC y α_w calculados para las muestras consideradas en este estudio. Las muestras preparadas con los mayores tamaños de partícula de WHS (C) mostraron los valores más elevados para estos dos parámetros tanto en el caso en el que la compactación manual, como para 1 y 2 t.

En la [Figura 5.15](#) se representan, a modo de ejemplo, los valores de NRC, α_w , la porosidad y la densidad de las muestras preparadas con un tamaño de partícula de WHS de 1 a 2 mm con respecto al grado de compactación empleado durante su preparación.

Las tendencias han sido similares para las muestras preparadas con menor tamaño de partícula. Un mayor grado de compactación incrementa la densidad y disminuye la porosidad, originando una disminución de los valores de NRC y α_w . Los mejores resultados se han obtenido con la muestra WHS-C-100 preparada con un tamaño de partícula de WHS entre 1 y 2 mm compactada de forma manual, para la cual se ha obtenido un valor de NRC de 0,40 y un α_w de 0,40 que le otorgan una D según la clasificación indicada en la [Tabla 5.3](#). Este valor es significativamente más alto que el obtenido por otras muestras preparadas a partir de otras biomásas como, por ejemplo, fibra de palmera datilera y fibra de coco (Mohammad et al., 2019).

Las tendencias han sido similares para las muestras preparadas con menor tamaño de partícula. Un mayor grado de compactación incrementa la densidad y disminuye la porosidad, originando una disminución de los valores de NRC y α_w . Los mejores resultados se han obtenido con la muestra WHS-C-100 preparada con un tamaño de partícula de WHS entre 1 y 2 mm compactada de forma manual, para la cual se ha obtenido un valor de NRC de 0,40 y un α_w de 0,40 que le otorgan una D según la clasificación indicada en la [Tabla 5.3](#). Este valor es significativamente más alto que el

obtenido por otras muestras preparadas a partir de otras biomásas como, por ejemplo, fibra de palmera datilera y fibra de coco (Mohammad et al., 2019).

Tabla 5.4. Coeficientes de absorción de muestras a base de biomásas publicados en la literatura y las muestras preparadas en este trabajo con WHS.

Biomasa	e (mm)	α_{min}	α_p	α_{max}	f (kHz)	Ref.
Corcho	20	0,02 (0,1 kHz)	-	0,54 (1,250 kHz)	0,1-6,3	(Gumanová et al., 2022)
Madera de palma	10	-	0,11	-	0,050-6,4	(Kolya y Kang, 2021)
Cascarilla de arroz (Densidad 0,10)	20	-	0,53	0,80 (2,912 kHz)	0,1-6,4	(C.-W. Kang et al., 2019)
Cascarilla de arroz (Densidad 0,12)			0,61	0,84 (2,720 kHz)		
Cascarilla de arroz (Densidad 0,14)			0,64	0,94 (2,160 kHz)		
Madera contrachapada con cascarilla de arroz (Densidad 0,10)			0,54	0,73 (3,120 kHz)		
Madera contrachapada con cascarilla de arroz (Densidad 0,12)			0,62	0,96 (2,520 kHz)		
Madera contrachapada con cascarilla de arroz (Densidad 0,14)			0,70	0,99 (2,352 kHz)		
Paja de trigo	60	-	-	0,6 (1,18-1,53 kHz)	0,2-2	(Iannace, 2017)
Desperdicios vegetales	40	-	-	0,64 (1,770 kHz)		
Madera de castaño			-	0,94 (1,15-1,28 kHz)		
Espuma PUR	20	0,04 (0,1 kHz)	-	0,41 (250 Hz)	0,1-6,3	(Gumanová et al., 2022)
Lana mineral		0,03 (0,1 kHz)		0,85 (250 Hz)		
WHS-A-100	14	0,07 (125 Hz)	-	0,25 (4 kHz)	0,125-4	Presente estudio
WHS-B-100		0,04 (125 Hz)		0,76 (2 kHz)		
WHS-C-100		0,05 (125 Hz)		0,77 (4 kHz)		
Nomenclatura: e: espesor; f: rango de frecuencia considerado; α_{min} : valor mínimo de α obtenido en la frecuencia indicada; α_{max} : valor máximo de α obtenido en la frecuencia indicada; α_p : valor promedio de α obtenido en el rango de frecuencias estudiado.						

Tabla 5.5. Características acústicas de las muestras preparadas con partículas de WHS de 14 mm de espesor variando el tamaño de partícula y el grado de compactación.

Muestra	Método de preparación	Tamaño de partícula (mm)	Densidad (g/cm ³)	α_w	NRC
WHS-A-100	M	< 0,5	0,330	0,15 (E)	0,15
WHS-B-100		0,5 - 1	0,241	0,25 (E)	0,40
WHS-C-100		1 - 2	0,343	0,40 (D)	0,40
WHS-A-100-1T	1 t	< 0,5	0,462	0,20 (E)	0,20
WHS-B-100-1T		0,5 - 1	0,622	0,15 (E)	0,25
WHS-C-100-1T		1 - 2	0,569	0,25 (E)	0,30
WHS-A-100-2T	2 t	< 0,5	0,749	0,10 (-)	0,05
WHS-B-100-2T		0,5 - 1	0,701	0,15 (E)	0,10
WHS-C-100-2T		1 - 2	0,611	0,20 (E)	0,25

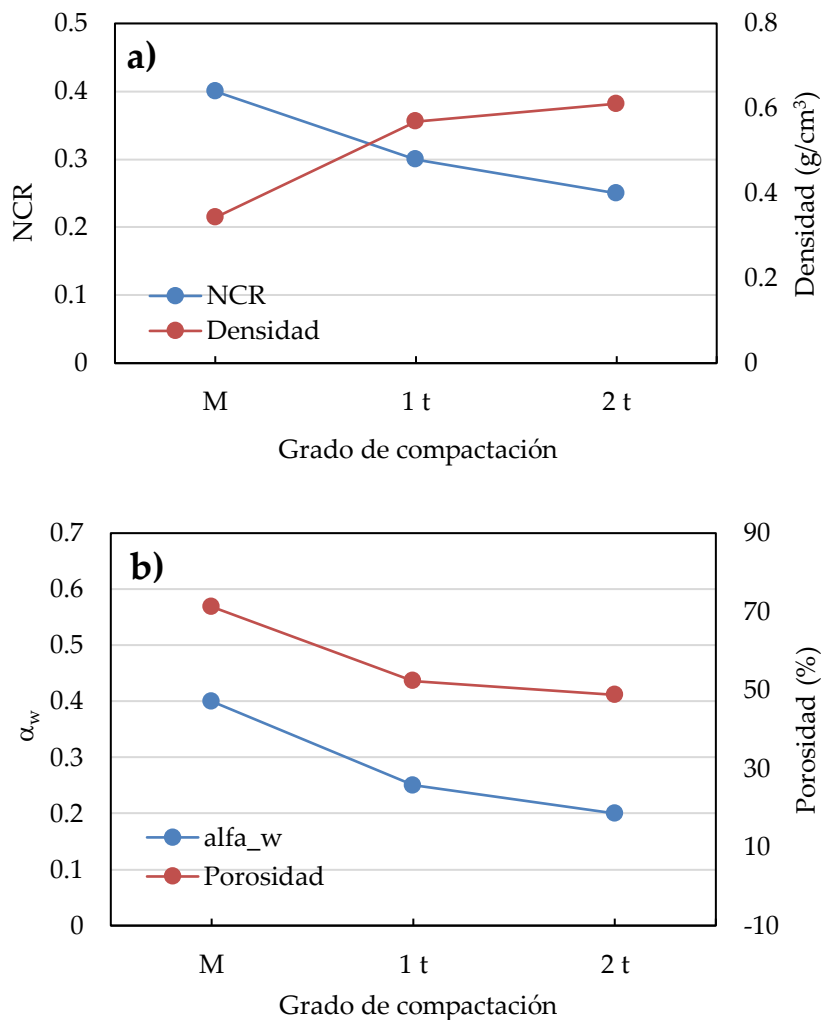


Figura 5.15. Influencia del grado de compactación en el NRC (a) y α_w (b). Tamaño de partícula C (1 mm < tp < 2 mm).

5.4.1.2. Estudio de la Influencia del Espesor de la Muestra

En este apartado se analiza la influencia del espesor de las muestras preparadas solo con WHS en la absorción acústica del material. A modo de ejemplo, en la [Figura 5.16](#) se representa el coeficiente de absorción del sonido frente a la frecuencia de tres muestras que han sido preparadas con carga controlada a 1 t, tamaño de partícula inferior a 0,5 mm y diferente espesor: WHS-A-100-1T (14 mm espesor), WHS-A-100-1T E1 (11 mm espesor) y WHS-A-100-1T-E2 (3 mm espesor).

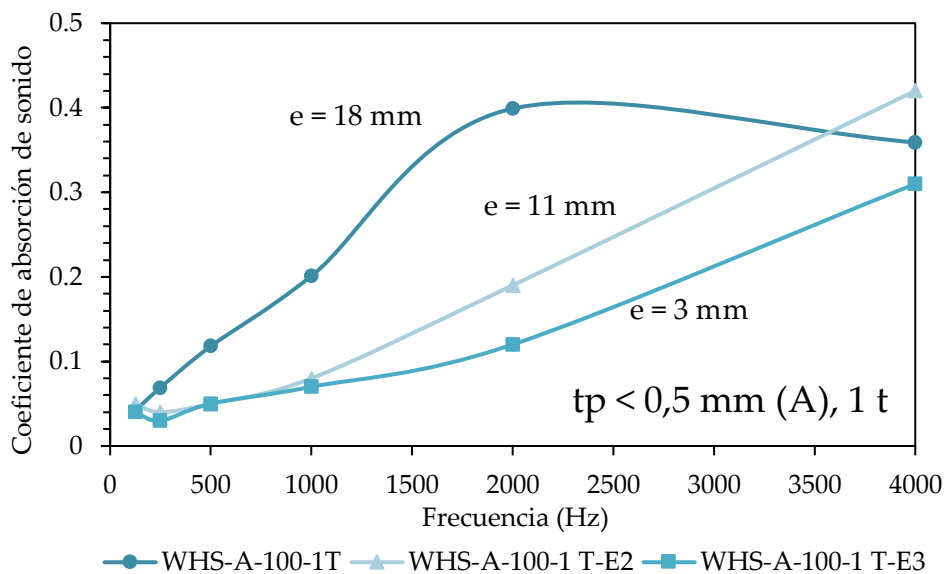


Figura 5.16. Coeficiente de absorción de sonido de las muestras con tamaño de partícula A ($tp < 0,5$ mm), preparadas a 1 T con diferentes espesores (e , mm).

Como era de esperar (ver [Figura 5.17](#)), al disminuir el espesor de la muestra disminuye significativamente la absorción acústica especialmente en el torno de las medias frecuencias. En la [Tabla 5.6](#) se muestran los valores de NRC y α_w determinados para estas muestras. Se observan valores muy bajos de estos dos parámetros para las muestras WHS-A-100-1T E1 y WHS-A-100-1T-E2 con respecto a la muestra de mayor espesor. Estos resultados son similares a los observados en otros materiales preparados a base de biomásas. Por ejemplo, en el estudio de un material compuesto por fibra de palmera datilera con fibra de coco (Mohammad et al., 2019), donde se comparan los resultados obtenidos para muestras con distintos espesores (10, 30 y 50 mm), se evidencia que, al disminuir el espesor de la muestra, la absorción acústica se reduce significativamente. Esto se refleja directamente en los valores de NRC. Así, en el caso de la muestra preparada en su totalidad de fibra de palmera datilera, este valor baja desde 0,55 para un espesor de 50 mm hasta 0,2 para un espesor de 10 mm. En nuestro caso el NRC decrece desde 0,2 para un espesor de 18 mm hasta 0,05 para un espesor de 3 mm.

A pesar de tener un espesor 8 mm mayor en nuestro caso, el NRC obtenido para la muestra WHS-A-100-1T ha sido similar al obtenido por la muestra preparada con fibra de palmera datilera (Mohammad et al., 2019). Esto podría estar influenciado por el grado de compactación, que como ya se ha comprobado en el apartado anterior, es un parámetro que puede influir significativamente en el grado de la absorción acústica. En el caso de la fibra de palmera datilera, se realizó una compactación con 30 kg durante 6 horas, mientras que, en nuestro caso, el WHS fue compactado con 1000 kg durante 24 horas. Por lo tanto, el grado de compactación de las muestras obtenidas con WHS ha sido significativamente superior al aplicado a la fibra de palmera datilera, obteniendo valores de absorción más bajos.

Tabla 5.6. Valores NRC y α_w de las muestras preparadas con diferente espesor.

Muestra	Método de preparación	Tamaño de partícula (mm)	e (mm)	α_w	NRC
WHS-A-100-1T	1 t	< 0,5	14	0,20 (E)	0,20
WHS-A-100-1T-E2			11	0,10 (-)	0,10
WHS-A-100-1T-E3			3	0,10 (-)	0,05
WHS-B-100	M	0-5 - 1	14	0,25 (E)	0,40
WHS-B-100-E2			7	0,20 (E)	0,20

Por otro lado, en la [Figura 5.17](#) se representa el coeficiente de absorción del sonido frente a la frecuencia de dos muestras que han sido preparadas compactando de forma manual y con un tamaño de partícula entre 0,5 y 1 mm: WHS-B-100 (14 mm de espesor) y WHS-B-100-E2 (7 mm de espesor). En este caso también se observa una disminución significativa de la absorción acústica al disminuir el espesor de la muestra, aunque esta disminución parece ser mucho menos importante que en la serie de muestras preparadas con carga controlada a 1 t. En este caso, donde los materiales han sido preparados mediante compactación manual, los resultados acústicos respecto al espesor también están en sintonía con los resultados publicados por otros autores. Por ejemplo, Boubel et al. (2021). analizan en su trabajo materiales preparados a partir de virutas de madera de secoya y haya, con diferentes tamaños de partículas y distintos espesores. Según sus resultados, tal como ocurre en el presente trabajo, la absorción acústica es mayor, cuanto mayor sea el espesor de la muestra. Además, la absorción de sonido también aumenta en bajas frecuencias en muestras con mayor espesor, como ocurre en el caso del WHS ([Figura 5.17](#)). Sin embargo, la cantidad de absorción no es necesariamente proporcional al espesor, ya que dependerá también del tipo de materiales y del método de preparación (Samsudin et al., 2016).

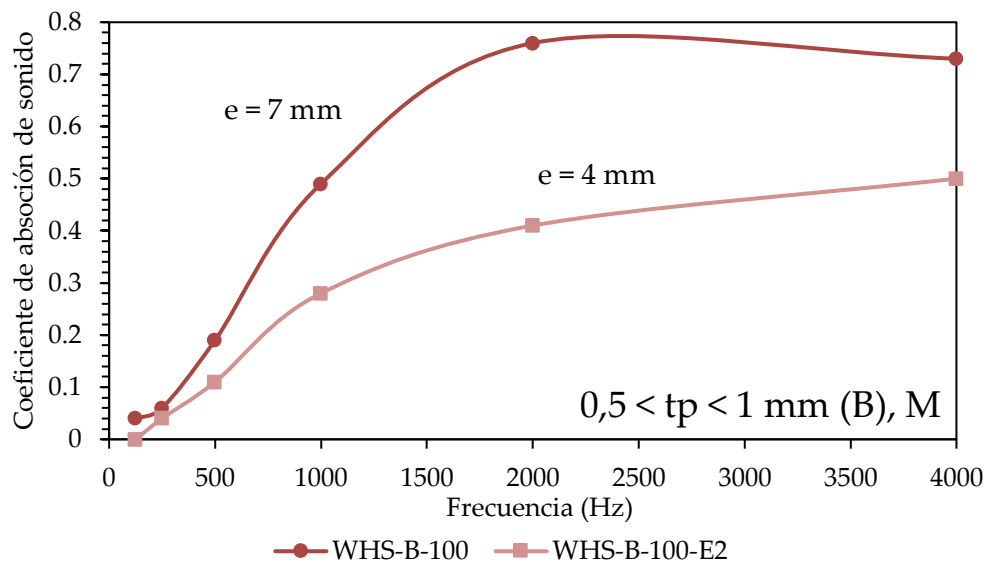


Figura 5.17. Coeficiente de absorción de sonido de las muestras preparadas WHS con tamaño de partícula B ($0,5 < t_p < 1$ mm), compactación manual (M) y diferentes espesores (e , mm).

5.4.1.3. Estudio de la Influencia de la adición de Ligantes en el Material

En este apartado se analiza la influencia de la adición de dos ligantes distintos (almidón de maíz, cola blanca) en el material fabricado de WHS con un tamaño de partícula entre 0,5 mm y 1 mm (B). Con el fin de comparar los resultados, también se consideran las muestras preparadas solo con WHS.

En la [Figura 5.18](#) se muestran las curvas del coeficiente de absorción del sonido frente a la frecuencia y en la [Tabla 5.7](#) se indican los espesores considerados y los valores del coeficiente de absorción, el NRC y la α_w obtenidos para cada muestra. De las curvas mostradas se desprende que la muestra WHS-B-100, la cual no tiene ningún tipo de ligante entre las partículas, ha sido la muestra que ha mostrado mayor absorción del sonido, sobre todo en el rango de frecuencias entre 1 y 4 kHz. Estos resultados muestran, que si bien la adición de ligante estaría asociada a la mejora de la rigidez de las muestras (Mati-Baouche et al., 2016; Nguyen et al., 2017), su efecto es perjudicial en relación con el comportamiento acústico. Sin embargo, a frecuencias inferiores a 500 Hz se obtienen valores de absorción acústica similares para los tres materiales, aunque ligeramente superiores para WHS-B-100. A frecuencias entorno a los 2 kHz, el valor máximo alcanzado por WHS-B-100 ha sido de 0,76. Si comparamos el rendimiento acústico de WHS-B-100-COLA y WHS-B-100-ALMIDÓN a esa misma frecuencia, se observa que la segunda ha alcanzado mayores valores de absorción que la primera, siendo estos de 0,36 y 0,51, respectivamente.

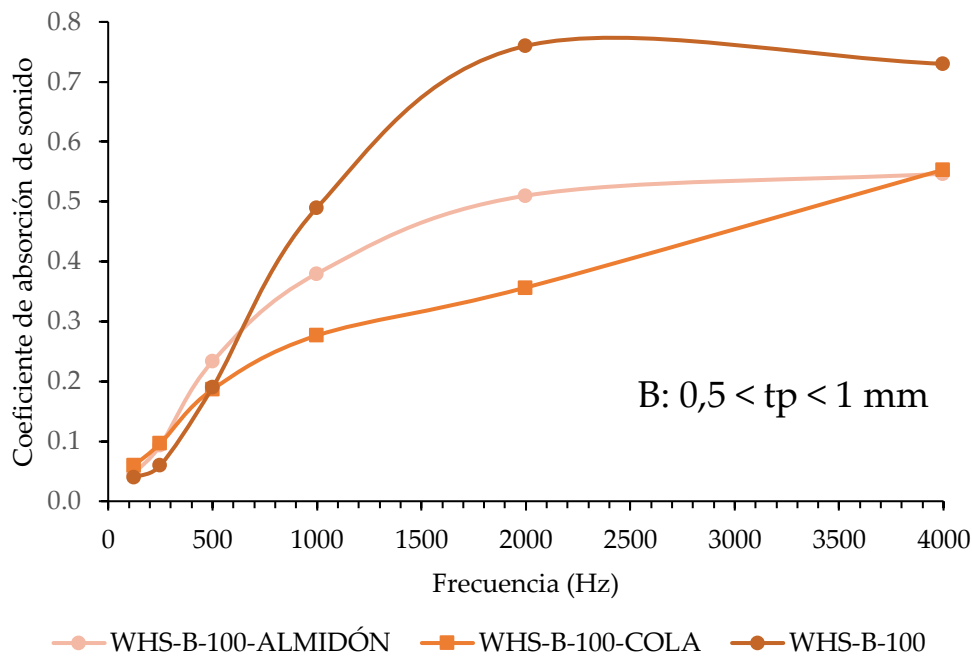


Figura 5.18. Coeficiente de absorción de sonido de las muestras preparadas con WHS con un tamaño de partícula de 0,5 a 1 mm (B), sin ligante y empleando almidón y cola como ligantes.

En línea con lo anteriormente comentado, el ligante cola parece haber sido más efectivo en la adherencia de partículas de WHS evitando el desarrollo de porosidad abierta entre partículas y, por tanto, mostrando un menor rendimiento acústico. Sin embargo, a frecuencias en torno a los 4 kHz, ambas muestras presentan un valor similar (0,55). Similares resultados se han publicado en trabajos de Alabdulkarem et al. (2018) quienes han estudiado nuevos materiales fabricados a partir de fibras de palmeras datileras y/o fibras de manzana de Sodoma incluyendo diferentes ligantes (almidón de maíz, cola y cemento blanco. En este trabajo se observó para esos materiales una baja absorción a bajas frecuencias, pero significativamente alta a medias frecuencias. Además, atendiendo a los máximos de absorción obtenidos para estos materiales encontramos datos similares en los estudios desarrollados por Mohamed Ali (Ali, 2016). Este autor analizó materiales compuestos por partículas de manzana de Sodoma y almidón de maíz y obtuvo un máximo del coeficiente de absorción acústica de 0,85 a una frecuencia de 6,3 kHz. Al considerar los valores incluidos en nuestro rango de frecuencias, el máximo del coeficiente de absorción acústica que observó fue de 0,76 para una frecuencia de 4 kHz. Aunque este valor es más elevado que el obtenido por WHS-B-100-ALMIDÓN para la misma frecuencia, se debe considerar que la muestra desarrollada por ese estudio presentaba un espesor de 20 mm, casi el doble que la preparada con WHS.

Entre los índices globales de caracterización acústica ([Tabla 5.7](#)), el NRC es más elevado para la muestra WHS-B-100 (0,40), seguida de WHS-B-100-ALMIDÓN (0,30) y WHS-B-100-COLA (0,25). Por otro lado, las muestras WHS-B-100-ALMIDÓN y WHS-B-100-COLA presentaron valores más altos de α_w que la muestra WHS-B-100 obteniéndose para ambas una clasificación D (ver [Tabla 5.3](#)), seguramente originado por presentar WHS-B-100 menor coeficiente de absorción acústica a frecuencias menores de 500 Hz.

Tabla 5.7. Valores de NRC, α_w y el coeficiente de absorción acústica a diferentes frecuencias, muestras preparadas solo con WHS y con otros ligantes.

Muestra	Tamaño de partícula (mm)	e (mm)	Densidad (g/cm ³)	α				NRC	α_w
				500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz		
WHS-B-100	0,5-1	14	0,241	0,19	0,49	0,76	0,73	0,40	0,25 (E)
WHS-B-100-ALMIDÓN			0,308	0,23	0,38	0,51	0,55	0,30	0,30 (D)
WHS-B-100-COLA			0,371	0,19	0,28	0,36	0,55	0,25	0,30 (D)

5.4.2. MATERIALES A BASE DE WHS MEZCLADO CON YESO

Esta sección se centra en la discusión de los resultados obtenidos de la caracterización acústica de las muestras preparadas a base de WHS mezclado con yeso. Con motivos de comparación, un primer apartado analiza el comportamiento acústico de muestras preparadas solo con yeso a distintos espesores comparando estos resultados con los obtenidos por otros autores bajo las mismas condiciones de medida. Seguidamente, se describen y evalúan los resultados de la caracterización acústica de las muestras preparadas combinando WHS con yeso bajo diferentes condiciones: cantidad de WHS en las muestras, tamaño de partícula del WHS, espesor de la muestra y grado de compactación de la muestra.

5.4.2.1. Comportamiento Acústico del Yeso Comercial

En este apartado se analiza el comportamiento acústico de muestras elaboradas con yeso comercial (G) y con diferentes espesores. Las muestras fueron preparadas bajo las mismas condiciones que las muestras obtenidas mezclando el yeso con las partículas WHS, de manera que se puedan comparar los resultados y determinar el impacto de la adición de biomasa al yeso sobre las propiedades acústicas del material.

En la [Figura 5.19](#) se muestra el comportamiento acústico de dos muestras de yeso comercial con distinto espesor. Si comparamos los valores obtenidos para la muestra G (14 mm) y la muestra G-E2 (6 mm), se observa que esta última muestra presenta muy

baja absorción del sonido con un máximo de 0,05, y un NRC y α_w también de 0,05. Además, el comportamiento acústico de la muestra G-E2 es muy similar en todas las frecuencias. Sin embargo, al incrementarse el espesor a 14 mm, se observa un incremento de la absorción acústica con mayor diferencia en el comportamiento acústico a las distintas frecuencias. Así, G alcanza un máximo de absorción acústica de 0,32 a 2 kHz, un valor NRC de 0,15 y un α_w de 0,15 que le otorga el nivel E dentro de la clasificación indicada anteriormente en la [Tabla 5.3](#). La curva del coeficiente de absorción frente a la frecuencia para la muestra G muestra que la absorción a bajas frecuencias es mucho menor que aquella obtenida a más altas frecuencias superiores a los 2 kHz.

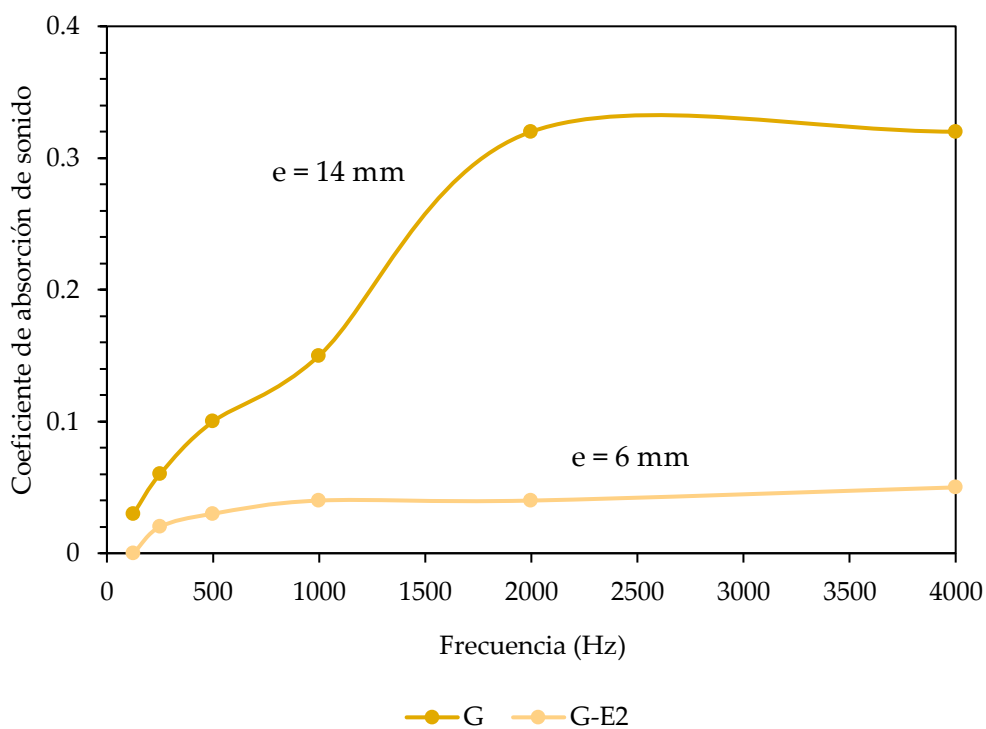


Figura 5.19. Coeficiente de absorción de sonido de las muestras preparadas con yeso con dos espesores distintos (G: 14 mm, G-E2: 6 mm).

En la [Tabla 5.8](#), se recogen los valores de absorción acústica de las muestras G y G-E2 y otras muestras elaboradas con yeso. En general, se observan valores parecidos de absorción acústica. También, las curvas de absorción acústica frente a la frecuencia de G y G-E2 muestran perfiles parecidos a los obtenidos en el trabajo publicado por otros autores (Čulík et al., 2020; De Oliveira et al., 2019). Esta similitud se extiende también a los valores de NRC, de manera que en el presente estudio se ha obtenido un valor de 0,15 y en el caso de Čulík et al. (2020) el valor alcanzado fue de 0,10.

Tabla 5.8. Coeficiente de absorción acústica a diferentes frecuencias, NRC y α_w para muestras preparadas en este trabajo y otras encontradas en la bibliografía.

Muestra	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	Densidad (g/m ³)	α_w	NRC	Ref.
G-E2 (6 mm)	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05	1,118	0,05 (-)	0,05	Presente estudio
G (14 mm)	0,06	0,1	0,15	0,32	0,32	1,328	0,15 (E)	0,15	Presente estudio
Fermacell (12,5 mm)	0,03	0,05	0,06	0,18	0,34	1,163	-	0,10	(Čulík et al., 2020)
Placa de yeso (13 mm)	0,12	0,08	0,06	-	-	0,568	-	-	(De Oliveira et al., 2019)
Yeso (15 mm)	-	0,20	0,18	0,24	-	1,307	-	-	(Pedreño-Rojas et al., 2017)
Yeso + 10% virutas de madera (15 mm)	-	0,18	0,27	0,21	-	1,166	-	-	
Yeso + 20% virutas de madera (15 mm)	-	0,22	0,19	0,35	-	0,954	-	-	
Yeso + 10% aserrín (15 mm)	-	0,21	0,33	0,22	-	1,187	-	-	
Yeso + 20% aserrín (15 mm)	-	0,23	0,31	0,54	-	1,044	-	-	

En conclusión, la absorción acústica del yeso es baja y presenta un mejor comportamiento acústico a altas frecuencias. Si se emplean espesores muy pequeños para la muestra, la absorción resulta ser bastante baja, y apenas se observan diferencias entre los valores en todo el rango de frecuencias. No obstante, a mayores espesores, aunque la absorción sigue siendo baja, esta aumenta sobre todo a altas frecuencias.

5.4.2.2. Comportamiento Acústico de los Materiales a Base de WHS Mezclados con Yeso

5.4.2.2.1. Estudio de la influencia de la cantidad de WHS y el tamaño de partícula

En este apartado se evalúa la influencia en el rendimiento de la absorción acústica de los materiales preparados con yeso (G) y partículas de WHS empleando diferentes proporciones (1:99-1:1) y diferentes tamaños de partícula de WHS [A (< 0,5 mm), B (0,5 < tp < 1 mm) y C (1 < tp < 2 mm)].

La [Figura 5.20](#) muestra las curvas del coeficiente de absorción acústico frente a la frecuencia para las tres series de muestras preparadas variando la proporción WHS:G. La [Tabla 5.9](#) muestra los valores del coeficiente de absorción acústica a diferentes frecuencias seleccionadas, el NRC y el α_w de las muestras. De los datos obtenidos, se desprende que el rendimiento acústico a bajas frecuencias ha sido mayor en las muestras que presentan WHS en comparación con el G sin relleno, a excepción de aquellas con la

cantidad más baja de WHS (proporción WHS:G de 1:99). Además, el máximo de la curva a bajas y medias frecuencias se desplaza hacia las frecuencias más bajas a medida que se incrementa la cantidad de WHS en el material. Esto parece ocurrir para las tres series, independientemente del tamaño de partícula de WHS, y está en línea con un aumento de la porosidad en la muestra creada por la presencia de estas partículas de WHS en el yeso como demuestra el descenso del valor de la densidad aparente de las muestras (ver [Tabla 5.9](#)). Por ejemplo, con una proporción WHS:G de 1:1 y un tamaño de partícula inferior a 0,5 mm (A) se ha conseguido una reducción de la densidad del yeso del 62%. Esto ha producido un incremento del coeficiente de absorción acústica a los 500 Hz de un 45% aproximadamente. Este resultado está en línea con el trabajo de Singh et al. (2022), que muestra que a medida que el contenido de residuos agrícolas aumentaba de 0 a 25% en peso, la densidad de las muestras de yeso disminuía un 35% y el coeficiente de absorción acústico aumentaba significativamente sobre todo en el rango de medias y altas frecuencias. Igualmente, nuestro resulta está en línea con Pedreño-Rojas et al. (2017), quienes reportan valores del coeficiente de absorción acústica de hasta 0,53 a 2 kHz añadiendo hasta un 20% en peso de serrín en la muestra de yeso, concluyendo que los materiales preparados con un mayor porcentaje de biomasa fueron los que ofrecieron mayor absorción de sonido.

En el presente trabajo de investigación, el coeficiente de absorción acústica se ha alcanza un valor máximo de 0,49 a 2 kHz con la muestra WHS-C-5 y un valor de 0,43 a 1 kHz con la muestra WHS-B-50. Sin embargo, Pedreño-Rojas et al. (2017) obtuvieron valores de hasta 0,6 para este parámetro a bajas frecuencias (en torno a los 250 Hz) realizando pequeñas perforaciones en el material; y Guna et al. (2021b), en placas de yeso reforzado con fibra de lana de oveja y coco en diferentes proporciones y configuraciones obtuvieron un rango de absorción del sonido de 0,15 a 0,35 con un compuesto fabricado con un 30% de fibra de coco y un 70% de yeso mostrando el máximo valor a una frecuencia de 550 Hz. El valor de NRC aumenta significativamente con la cantidad de WHS incorporada en las muestras de yeso con respecto al yeso sin mezclar ([Tabla 5.9](#)).

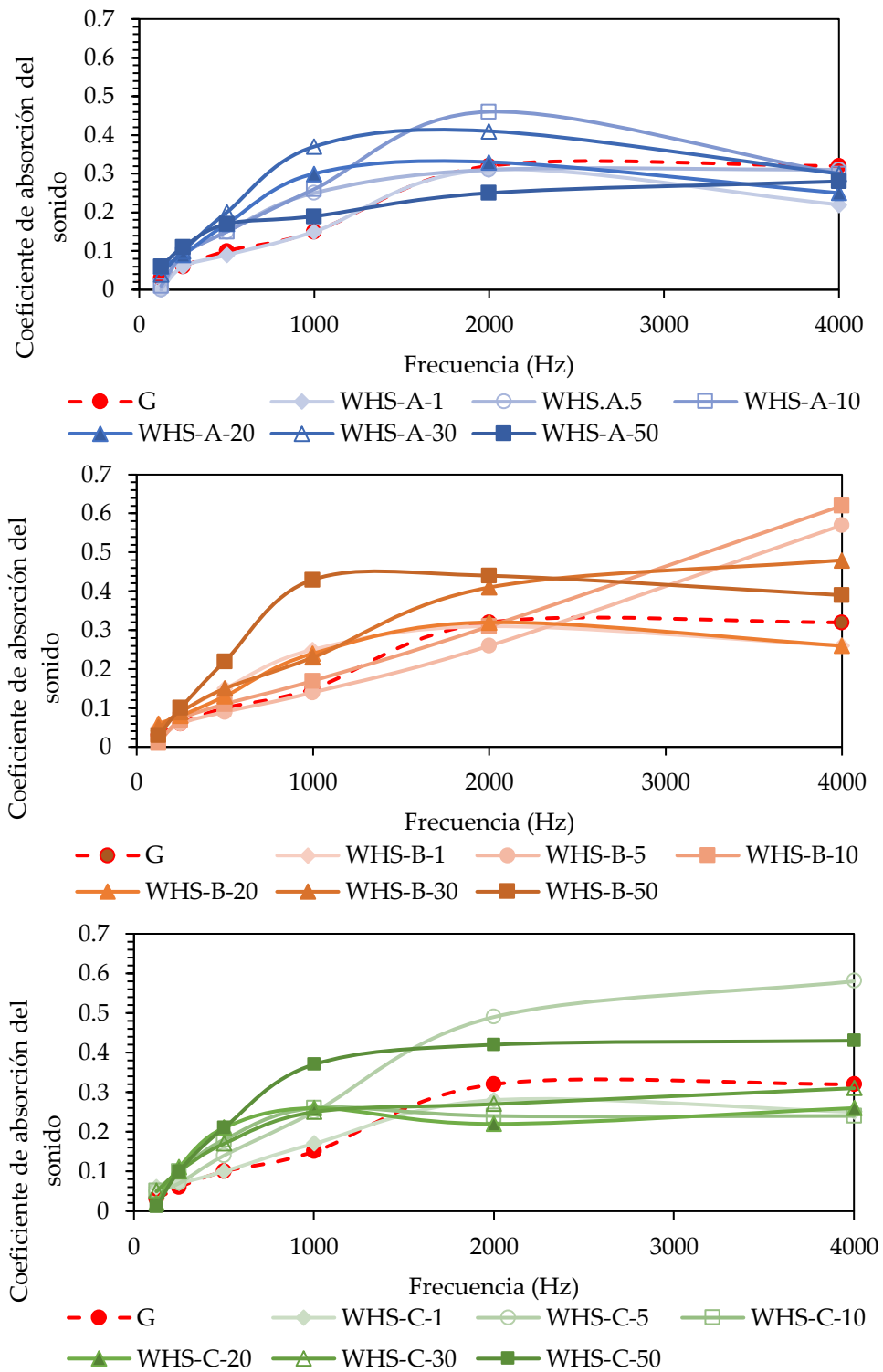


Figura 5.20. Coeficiente de absorción de sonido de las muestras preparadas con yeso y WHS a diferentes proporciones WHS:yeso y diferentes tamaño de partícula (A (<math>tp < 0,5\text{ mm}</math>), B (<math>0,5 < tp < 1\text{ mm}</math>) y C (<math>1 < tp < 2\text{ mm}</math>)). Espesor de las muestras: 14 mm.

Tabla 5.9. Valores del coeficiente de absorción acústica a diferentes frecuencias, el NRC y α_w para las muestras preparadas con yeso y WHS ($e = 14$ mm).

Muestra	Tamaño de partícula (mm)	Densidad (g/cm ³)	α				NRC	α_w
			500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz		
G	<0,5	1,328	0,10	0,15	0,32	0,32	0,15	0,15 (E)
WHS-A-1		1,047	0,09	0,15	0,31	0,22	0,15	0,15 (E)
WHS-A-5		0,987	0,15	0,25	0,31	0,31	0,20	0,25 (E)
WHS-A-10		0,897	0,15	0,26	0,46	0,30	0,5	0,25 (E)
WHS-A-20		0,720	0,17	0,30	0,33	0,25	0,20	0,25 (E)
WHS-A-30		0,606	0,20	0,37	0,41	0,30	0,25	0,30 (D)
WHS-A-50		0,505	0,17	0,19	0,25	0,28	0,20	0,20 (E)
WHS-B-1	0,5-1	1,089	0,15	0,25	0,31	0,26	0,20	0,25 (E)
WHS-B-5		1,006	0,09	0,14	0,26	0,57	0,15	0,15 (E)
WHS-B-10		0,936	0,11	0,17	0,31	0,62	0,15	0,15 (E)
WHS-B-20		0,786	0,13	0,24	0,32	0,26	0,20	0,25 (E)
WHS-B-30		0,767	0,15	0,23	0,41	0,48	0,20	0,25 (E)
WHS-B-50		0,464	0,22	0,43	0,44	0,39	0,30	0,30 (D)
WHS-C-1	1-2	1,053	0,10	0,17	0,28	0,25	0,15	0,15 (E)
WHS-C-5		0,937	0,14	0,25	0,49	0,58	0,25	0,25 (E)
WHS-C-10		0,880	0,18	0,26	0,24	0,24	0,20	0,25 (E)
WHS-C-20		0,766	0,21	0,26	0,22	0,26	0,20	0,25 (E)
WHS-C-30		0,617	0,17	0,25	0,27	0,31	0,20	0,25 (E)
WHS-C-50		0,481	0,21	0,37	0,42	0,43	0,30	0,30 (D)

La [Figura 5.21](#) ilustra la variación del NRC y el α_w con respecto a la densidad y la porosidad, respectivamente, al variar la cantidad de WHS presente en las muestras para un tamaño de partícula de WHS entre 1 y 2 mm (B). La tendencia es similar para las muestras preparadas con los otros tamaños de partícula A y C. Estos dos coeficientes aumentan realmente con respecto al yeso a partir de proporciones WHS:G superiores al 1:4 que otorga al material compuesto una densidad de 0,786 g/cm³ y un aumento de la porosidad total del 15% con respecto a la del yeso sin WHS.

La muestra que mayor valor ha presentado para el NRC con respecto al yeso sin mezclar ha sido la muestra WHS-B-50 (0,30). Singh et al. (2022) observaron que los valores de NRC aumentaban del 25 al 45% al añadir al yeso paja de arroz hasta un 25% en peso en muestras de 20 mm de espesor, y atribuían este incremento al aumento de la porosidad de la muestra derivado del mayor contenido de paja. En nuestro caso, este parámetro se ha incrementado prácticamente al doble añadiendo hasta un 50% en peso de WHS. Por otro lado, los valores obtenidos para el α_w nos indican que tres de las muestras preparadas (WHS-A-30, WHS-B-50 y WHS-C-50) han alcanzado la clasificación D, superior a la determinada para el yeso sin mezclar con la biomasa.

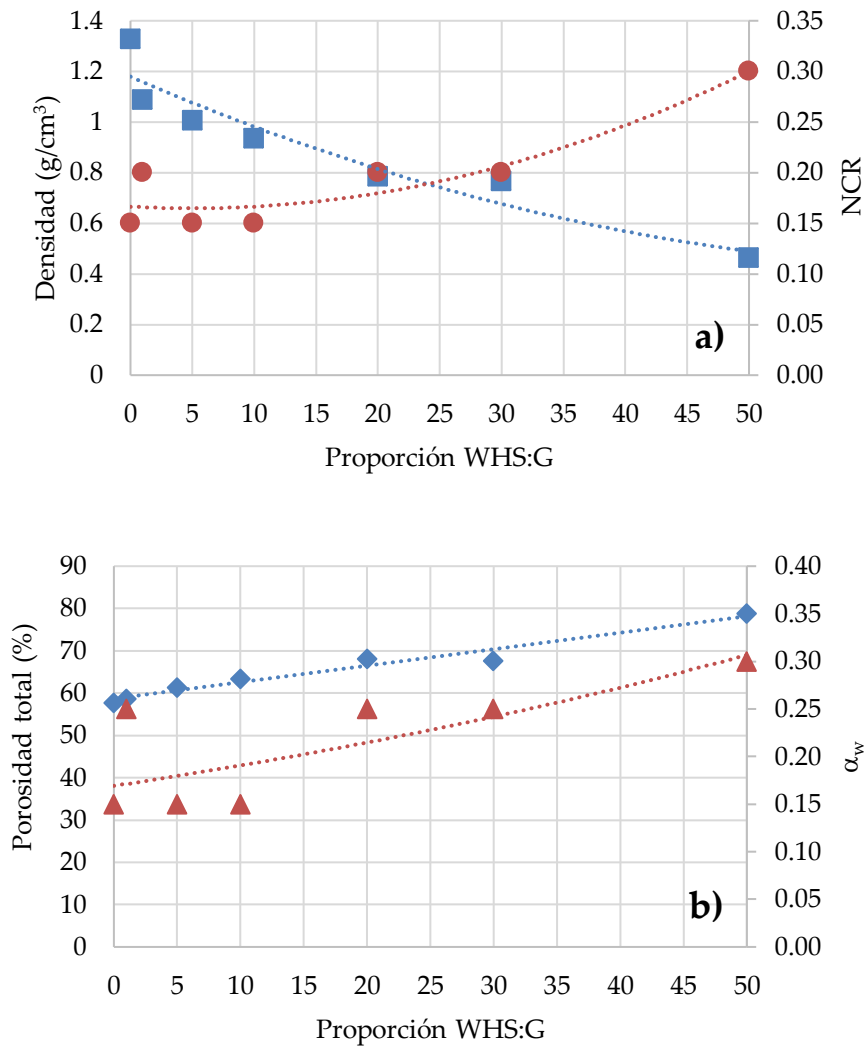


Figura 5.21. Influencia de la cantidad de WHS (tamaño de partícula B) en: a) la densidad (■) y el parámetro NCR (●), y b) la porosidad (◆) y el parámetro α_w (▲).

5.4.2.2.2. Estudio de la influencia del espesor

En la [Figura 5.22](#) se muestran las curvas del coeficiente de absorción de sonido frente a la frecuencia de las muestras preparadas con distintas proporciones WHS:G y diferente espesor de la muestra.

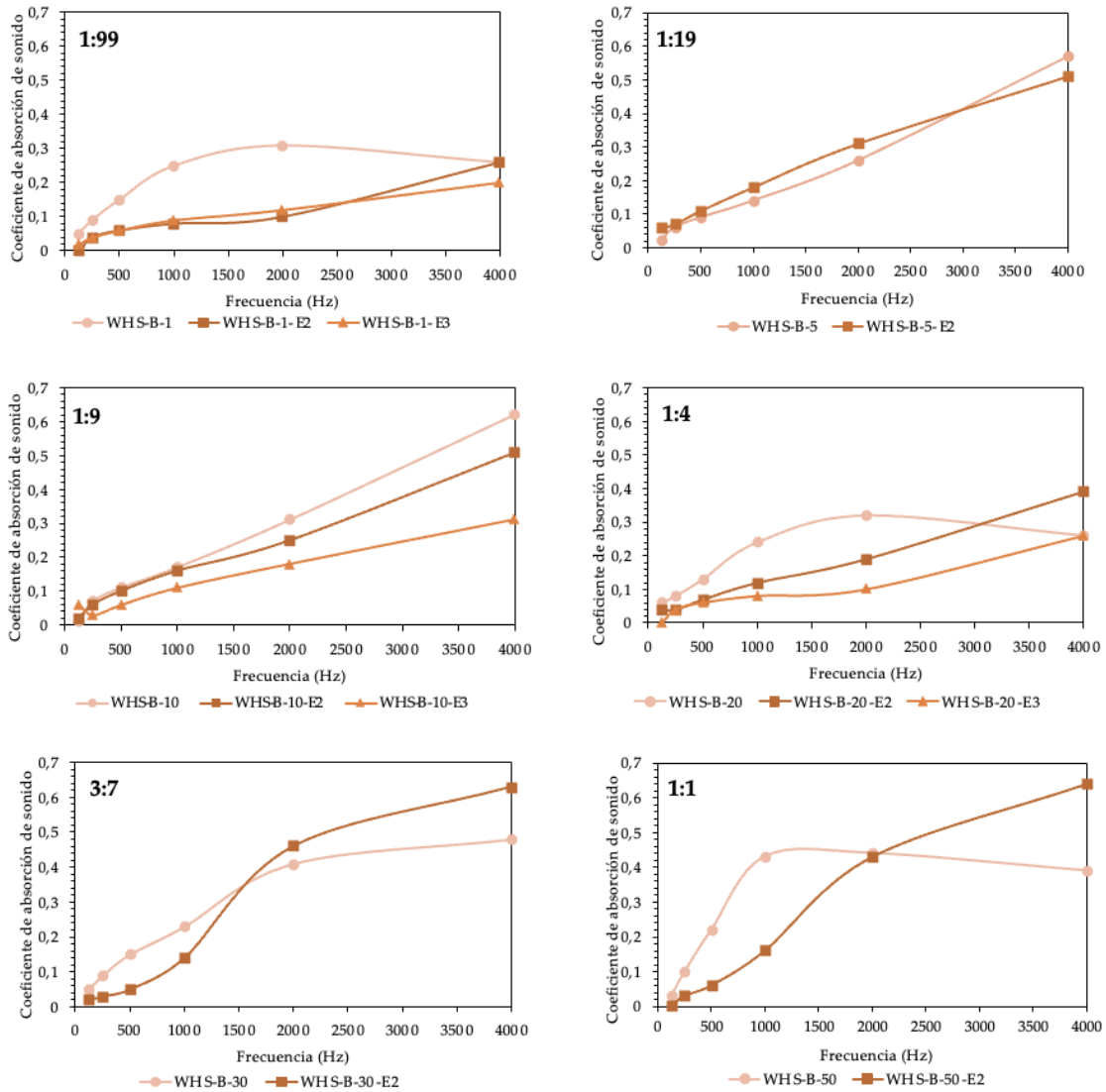


Figura 5.22. Curvas del coeficiente de absorción del sonido frente a la frecuencia de las muestras preparadas con un tamaño de partícula para WHS de B ($0,5 < t_p < 1$ mm), proporciones WHS:yeso entre 1:99 y 1:1.

De forma general, al igual que ocurre en el caso de las muestras preparadas solo con WHS, la disminución del espesor de la muestra implica una disminución clara de la absorción del sonido, sobre todo a medias y bajas frecuencias. Las muestras de menor espesor parecen tener mejor rendimiento acústico a medias y elevadas frecuencias en proporciones de WHS:G superiores a 1:4.

La [Tabla 5.10](#) muestra los valores del coeficiente de absorción acústica a diferentes frecuencias, el NRC y α_w para las muestras preparadas con yeso mezclado con WHS-B ($t_p = 0,5 - 1$ mm), distinto el espesor de la muestra y diferente cantidad de WHS

incorporada en la muestra. La mayoría de las muestras con mayor cantidad de yeso y menor espesor no llegan a alcanzar un nivel de calificación acústica. Sin embargo, las muestras con mayor cantidad de WHS alcanzan una clasificación acústica para los espesores menores. La muestra que mejor absorción acústica ha presentado es la WHS-B-50 con un valor NRC y α_w de 0,30 y una clasificación D. Estos valores han descendido para la muestra con espesor menor (WHS-B-50-E2) hasta 0,15 con una clasificación E.

Tabla 5.10. Valores del NRC y α_w para las muestras preparadas con un tamaño de partícula para WHS de B ($0,5 < t_p < 1$ mm), proporciones WHS:yeso entre 1:99 y 1:1 y diferentes espesores.

Muestra	Tamaño de partícula (mm)	e (mm)	Densidad (g/cm ³)	α				NRC	α_w
				500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz		
WHS-B-1	0,5-1	14	1,089	0,15	0,25	0,31	0,26	0,20	0,25 (E)
WHS-B-1-E2		10	1,228	0,06	0,08	0,10	0,26	0,05	0,10 (-)
WHS-B-1-E3		5	1,147	0,06	0,09	0,12	0,20	0,10	0,10 (-)
WHS-B-5		14	1,006	0,09	0,14	0,26	0,57	0,15	0,15 (E)
WHS-B-5-E2		7	1,024	0,11	0,18	0,31	0,51	0,15	0,10 (-)
WHS-B-10		14	0,936	0,11	0,17	0,31	0,62	0,15	0,15 (E)
WHS-B-10-E2		10	0,992	0,10	0,16	0,25	0,51	0,15	0,15 (E)
WHS-B-10-E3		5	0,908	0,06	0,11	0,18	0,31	0,10	0,10 (-)
WHS-B-20		14	0,786	0,13	0,24	0,32	0,26	0,20	0,25 (E)
WHS-B-20-E2		9	0,808	0,07	0,12	0,19	0,39	0,10	0,20 (E)
WHS-B-20-E3		5	0,744	0,06	0,08	0,10	0,26	0,05	0,10 (-)
WHS-B-30		14	0,767	0,15	0,23	0,41	0,48	0,20	0,25 (E)
WHS-B-30-E2		6	0,691	0,05	0,14	0,46	0,63	0,15	0,15 (E)
WHS-B-50		14	0,464	0,22	0,43	0,44	0,39	0,30	0,30 (D)
WHS-B-50-E2		6	0,556	0,06	0,16	0,43	0,64	0,15	0,15 (E)

5.4.2.2.3. Estudio del efecto de la carga aplicada durante la preparación de las muestras

La [Figura 5.23](#) muestra los valores de absorción de sonido frente a la frecuencia de las muestras preparadas con una proporción WHS:G de 3:7 ([Figura 5.24](#) a) y 1:1 ([Figura 5.23](#) b), un tamaño de partícula para WHS de B ($0,5 < t_p < 1$ mm) a diferentes grados de compactación. La [Tabla 5.11](#) indica los espesores considerados y los valores del coeficiente de absorción, el NRC y la α_w obtenidos para cada muestra.

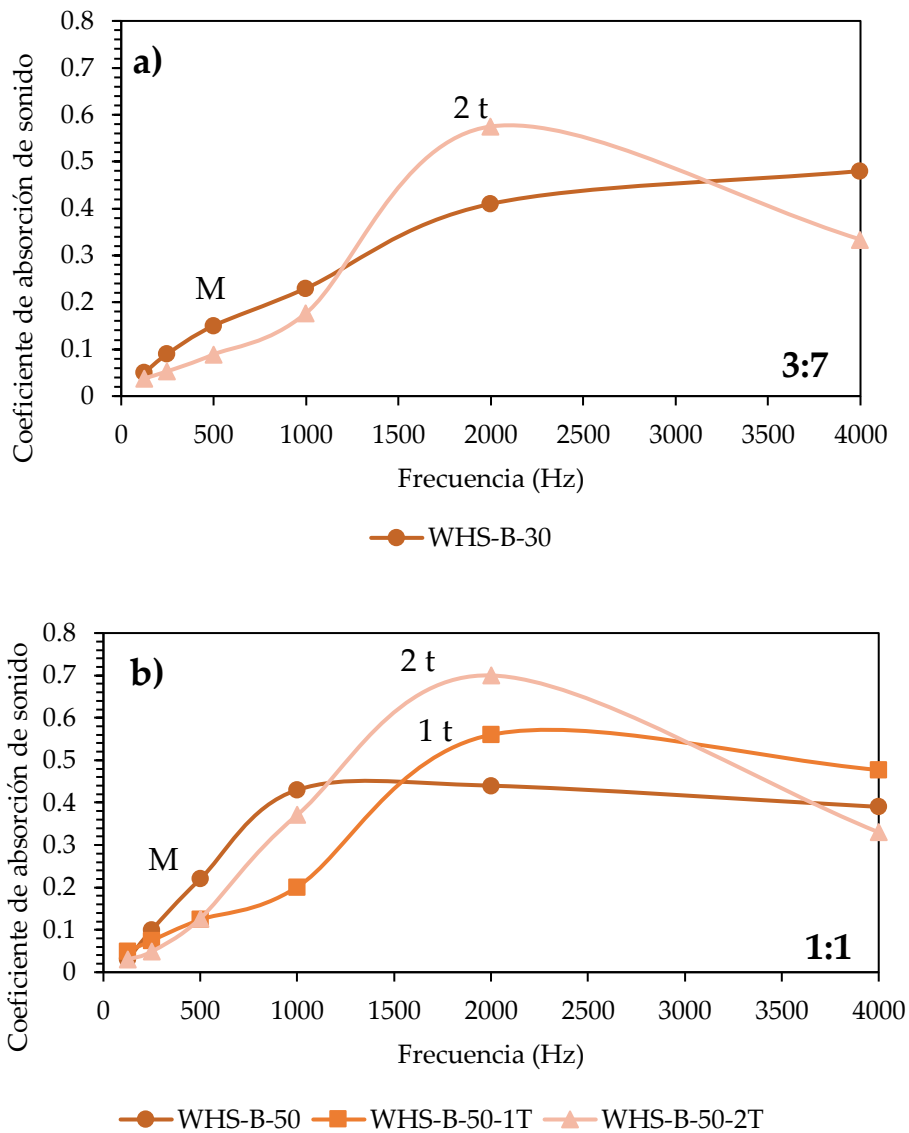


Figura 5.23. Curvas del coeficiente de absorción del sonido frente a la frecuencia de las muestras preparadas con un tamaño de partícula para WHS de B ($0,5 < t_p < 1$ mm), proporciones WHS:yeso 3:7 (a) y 1:1 (b) y diferentes grados de compactación (M, 1 t y 2 t).

La [Figura 5.23](#) permite observar que, como en el caso de las muestras preparadas solo con WHS, el grado de compactación también ha influido en el rendimiento acústico de las muestras basadas en WHS y yeso en una proporción 1:1. Se observa que las muestras obtenidas mediante compactación manual (M) parecen ser, en ambos casos, mucho más efectivas en la absorción del sonido en el área de media y bajas frecuencias. Igualmente, se observa que la compactación controlada con la prensa hidráulica ha mejorado la absorción acústica en torno a los 2 kHz, pero no parece haber influido de forma relevante en la absorción acústica a frecuencias en torno a los 4 kHz.

La [Tabla 5.11](#) muestra los valores del coeficiente de absorción acústica a diferentes frecuencias, el NRC y α_w para las muestras preparadas con yeso mezclado con WHS-B ($t_p = 0,5 - 1$ mm) a las proporciones de 1:1 y 3:7, variando la compactación empleada durante la preparación de las muestras. En este caso no se observa un efecto importante del grado de compactación en el valor de estos dos coeficientes ya que se mantienen en valores similares. Hay que tener en cuenta que el mecanismo de endurecimiento de estos sólidos difiere del de las muestras preparadas solo con WHS. En los primeros no ocurre el fraguado ni la unión química de las partículas que conforman el sólido mientras que en los segundos tiene lugar la unión química de las partículas del yeso. En este caso la influencia del grado de compactación ha tenido menor relevancia en la absorción acústica que en el caso de los materiales preparados solo con WHS, si bien a bajas frecuencias se observa una disminución del coeficiente a medida que aumenta el grado de compactación ([Figura 5.23](#)).

Tabla 5.11. Coeficiente de absorción acústica a diferentes frecuencias, NRC y α_w para muestras preparadas con yeso y WHS con proporciones 1:1 y 3:7 preparadas con carga controlada.

Muestra	Tamaño de partícula (mm)	e (mm)	Densidad (g/cm ³)	α				NRC	α_w
				500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz		
WHS-B-50	0,5-1	14	0,464	0,22	0,43	0,44	0,39	0,30	0,30 (D)
WHS-B-50-1T		15	-	0,12	0,20	0,56	0,48	0,25	0,20 (E)
WHS-B-50-2T		15	0,904	0,13	0,37	0,70	0,33	0,30	0,25 (E)
WHS-B-30		14	0,767	0,15	0,23	0,41	0,48	0,20	0,25 (E)
WHS-B-30-2T		13	1,114	0,09	0,18	0,58	0,33	0,20	0,20 (E)

5.4.3. MATERIALES A BASE DE WHS COMBINADO CON OTROS MATERIALES CONSTRUCTIVOS

En este apartado se discuten los resultados obtenidos de la caracterización acústica de las muestras preparadas a base de WHS con un tamaño de partícula entre 0,5 mm y 1 mm (B) con la incorporación de otros materiales constructivos (cemento y resina epoxi). Con el fin de comparar los resultados, en este apartado también se consideran las muestras preparadas con yeso.

La [Figura 5.24](#) muestra una imagen de las muestras preparadas solo con WHS (WHS-B-100) y de aquellas preparadas mezclando partículas WHS con yeso (WHS-B-10), cemento (WHS-B-10-CEMENTO) y resina epoxi (WHS-B-10-RESINA), utilizando las mismas proporciones WHS:matriz (1:9 y 1:1), tamaño de partícula (B) y espesor (14 mm). Se observan diferentes texturas y coloración dependiendo del tipo de aglutinante utilizado.

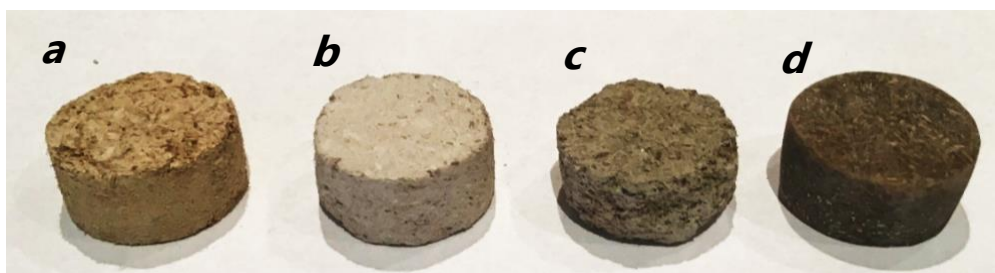


Figura 5.24. Muestras para caracterización acústica obtenidas con partículas de WHS embebidas en distintas matrices: a) WHS-B-100, b) WHS-B-10, c) WHS-B-10-CEMENTO y d) WHS-B-10-RESINA

La [Figura 5.25](#) muestran las curvas del coeficiente de absorción del sonido frente a la frecuencia para todas estas muestra y la [Tabla 5.12](#) muestra los espesores considerados y los valores del coeficiente de absorción a diferentes frecuencias, el NRC y α_w determinados para cada muestra. La [Figura 5.25](#) indica que la matriz empleada en la preparación de la muestra ha influido significativamente en el rendimiento acústico de las mismas. Para una proporción WHS:matriz de 1:9, se observa que a frecuencias inferiores a 500 Hz los valores del coeficiente de absorción han sido bastante bajos para todas las muestras. Sin embargo, a frecuencias superiores a los 500 Hz, este coeficiente aumenta progresivamente alcanzando valores máximos en torno a los 4 kHz que dependen del tipo de material empleado como matriz. Los máximos de absorción obtenidos a esa frecuencia han sido 0,42 para WHS-B-10-RESINA, 0,62 para WHS-B-10 y 0,66 para WHS-B-10-CEMENTO.

Para la muestra WHS-B-10-RESINA se observa muy baja absorción de sonido en el rango de frecuencias inferior a 2 kHz (ver [Figura 5.25](#) a). A partir de esta frecuencia, se incrementa el rendimiento acústico hasta alcanzar valores de 0,4 en torno a los 4 kHz. Similar comportamiento ha sido observado recientemente para materiales compuestos preparados con fibras de sisal y palmera y resina epoxi (Dhandapani y Megalingam, 2022). Los bajos valores de absorción obtenidos podrían estar relacionados con el hecho de que la matriz de resina epoxi es un material muy poco poroso. Las partículas inmersas dentro de este material no quedan accesibles al exterior y, consecuentemente, no ayudan a la absorción de las ondas sonoras que inciden en la superficie del material. El hecho de que las partículas de WHS incorporadas en la resina tengan una estructura interna porosa parece haber ayudado a disipar la energía sonora sobre todo a elevadas frecuencias. También, Hassan et al. (2020) han evaluado el rendimiento acústico de una serie de materiales compuestos a base de fibras naturales y resina epoxi, obteniendo los valores máximos para un 20% del contenido de fibra, valores que permanecieron siempre por debajo de 0,2 a frecuencias en torno a los 1,6 kHz.

Por otro lado, la muestra preparada con partículas de WHS en una matriz de cemento (ver [Figura 5.25 a](#)) ha mostrado valores de absorción acústica algo superiores a los obtenidos por la muestra WHS-B-10, sobre todo en el rango de frecuencias entre 500 Hz y 4 kHz. Sin embargo, WHS-B-10 presenta mejor rendimiento a frecuencias inferiores a los 500 Hz. En los últimos años, diferentes estudios (e.g., Tie et al., 2020) han investigado la influencia de la adición de biomazas en las propiedades de compuestos a base de cemento y hormigón, evaluando, por ejemplo, las propiedades acústicas de materiales de cemento y partículas de cáñamo, observándose máximos de absorción en torno a los 1 kHz para las muestras preparadas con una proporción biomasa:aglutinante de 1:2 (Fernea et al., 2019).

Por otra parte, al aumentar la cantidad de WHS en la muestra, proporción WHS:matriz de 1:1(ver [Figura 5.25 b](#)), se observa que el coeficiente de absorción del sonido de las muestras se incrementa significativamente, independientemente del tipo de matriz. Probablemente una mayor cantidad de WHS en el material compuesto permite que las ondas sonoras pasen por un camino más tortuoso, causando una mayor fricción, por lo que se produce una mayor pérdida de energía y, por tanto, mayor absorción del sonido. Se observa un mayor coeficiente de absorción del sonido para la muestra WHS-B-50 a frecuencias inferiores a los 1 kHz.

Según la [Tabla 5.12](#), las muestras preparadas con cemento y yeso muestran similares valores de α_w que les otorga una clasificación de E en absorción acústica (ver [Tabla 5.3](#)), si bien, el valor de este parámetro es ligeramente superior para la muestra con mayor proporción de WHS (WHS-B-50), que es la menos densa de las tres, alcanzando un valor D en la clasificación acústica. La muestra WHS-B-10-RESINA mostró un valor de α_w significativamente más bajo, en torno a 0,05, por lo que no obtiene asignación dentro de la clasificación según la normativa.

Tabla 5.12. Coeficientes de absorción acústica a diferentes frecuencias, NRC y α_w para muestras preparadas con WHS y materiales constructivos preparadas mediante compactación manual.

Muestra	Tamaño de partícula (mm)	e (mm)	Densidad (g/cm ³)	α				NRC	α_w
				500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz		
WHS-B-10	0,5-1	14	0,936	0,11	0,17	0,31	0,62	0,15	0,15 (E)
WHS-B-10-CEMENTO			0,997	0,11	0,29	0,60	0,66	0,25	0,20 (E)
WHS-B-10-RESINA			1,034	0,02	0,04	0,07	0,42	0,05	0,05 (-)
WHS-B-50			0,464	0,22	0,43	0,44	0,39	0,30	0,30 (D)
WHS-B-50-CEMENTO			0,509	0,15	0,32	0,62	0,53	0,30	0,25 (E)

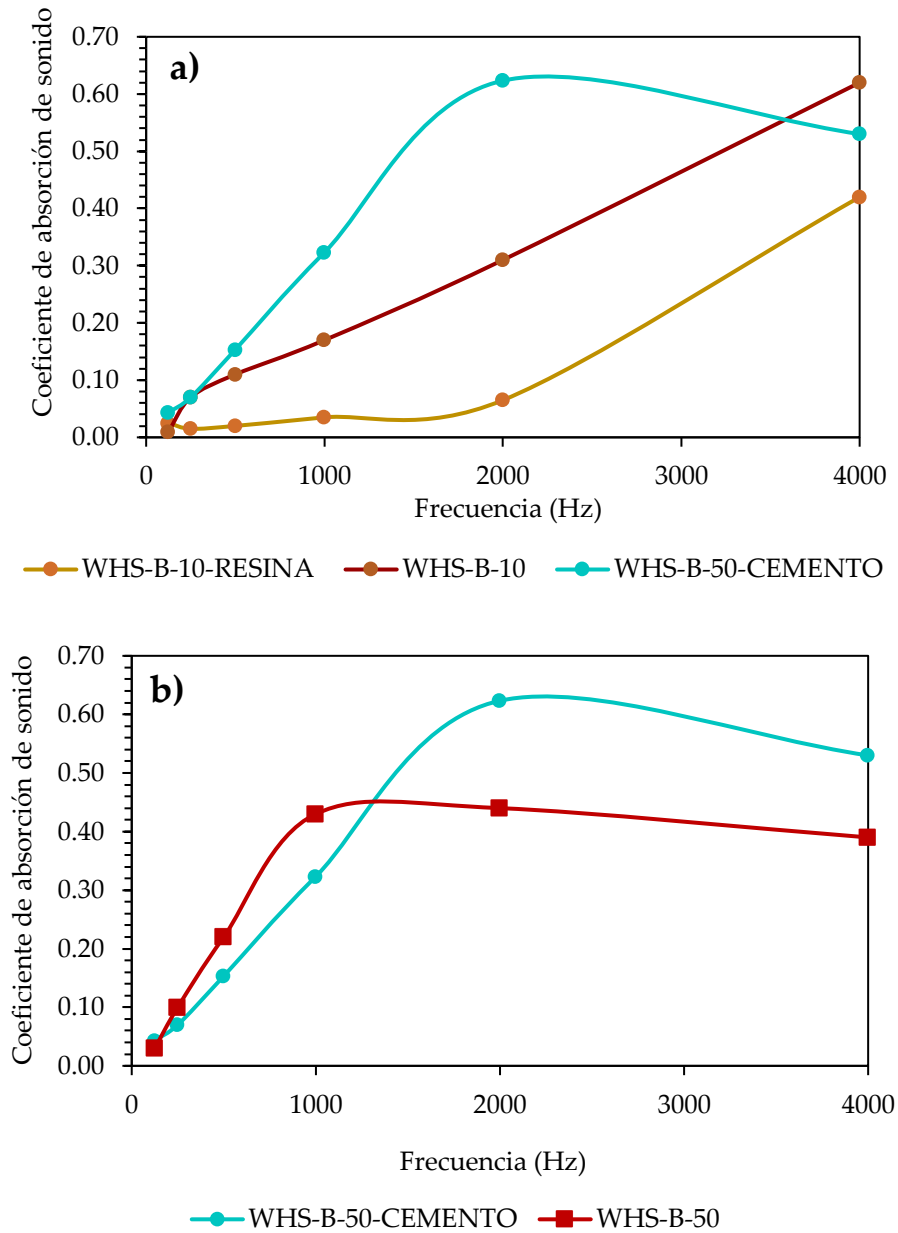


Figura 5.25. Coeficiente de absorción de sonido frente a la frecuencia de: a) muestras preparadas con un tamaño de partícula de WHS entre 0,5 y 1 mm con diferentes matrices (cemento, resina y yeso); b) muestras preparadas con un tamaño de partícula de WHS entre 0,5 y 1 mm con cemento y yeso.

5.5 CONCLUSIONES

La investigación presentada en este capítulo de la memoria ha permitido extraer las siguientes conclusiones:

- El rendimiento acústico de las muestras preparadas solo con WHS depende significativamente del tamaño de partícula, el grado de compactación y el espesor de la muestra. Específicamente:
 - Tamaños de partícula de WHS superiores a 0,5 mm mejoraron significativamente la absorción acústica de las muestras, obteniéndose los mejores resultados con partículas de tamaño entre 0,5 y 1 mm.
 - A mayor grado de compactación se obtiene menor coeficiente de absorción del sonido, sobre todo a bajas y medias frecuencias, en comparación con las muestras preparadas de forma manual.
 - Un incremento en el espesor de la muestra mejora significativamente el rendimiento acústico de las muestras, sobre todo a medias y bajas frecuencias.
 - Para obtener un aceptable rendimiento acústico a frecuencias inferiores o iguales a 1 kHz, las muestras deberían prepararse con carga manual y un tamaño de partícula de WHS comprendido entre 1 y 2 mm. Para obtener mayor absorción acústica a frecuencias entorno a los 1 y 2 kHz, se podría emplear la compactación manual o la controlada a 1 t y tamaños de partícula siempre superiores a 0,5 mm. Las mayores absorciones a 4 kHz se han alcanzado preparando las muestras de forma manual con tamaño de partícula superior a 0,5 mm. Los mejores valores de NRC y α_w se han obtenido para las muestras WHS-B-100 y WHS-C-100, preparadas con compactación manual y con un tamaño de partícula de WHS de entre 0,5-1 mm y 1-2 mm, respectivamente.
 - La inclusión de un ligante extra en las muestras preparadas solo con WHS con la finalidad de mejorar la adherencia de las partículas disminuye significativamente el rendimiento acústico de estas, sobre todo a bajas y medias frecuencias. Así mismo, la fortaleza del ligante parece aumentar esa disminución. A frecuencias menores a 500 Hz, la presencia de ligante en la muestra mejora ligeramente la absorción acústica de las muestras.

- El rendimiento acústico de las muestras preparadas con WHS y yeso también depende de manera importante de la proporción WHS:G, del tamaño de partícula, del grado de compactación y del espesor de las muestras durante la caracterización acústica. Específicamente:
 - La incorporación de WHS al yeso incrementa la absorción acústica de este material, sobre todo a frecuencias entre los 0,5 y 1 kHz, a elevadas proporciones de WHS (1:1) y a tamaños de partícula superiores a los 0,5 mm. Además, el máximo de la curva del coeficiente de absorción frente a la frecuencia parece desplazarse a menores frecuencias a medida que se incrementa la cantidad de WHS en el material. Esto parece ocurrir para las tres series, independientemente del tamaño de partícula de WHS.
 - Las muestras preparadas con partículas de WHS y yeso también muestran una variación en los resultados acústicos en función del espesor de la muestra. Se observa que, a mayor espesor de la muestra, mayor absorción acústica. Si bien, esta diferencia es más significativa para las muestras que tienen mayor cantidad de WHS.
 - El incremento de la carga empleada durante la preparación de las muestras compuestas por WHS y yeso parece disminuir el rendimiento acústico de las muestras a bajas frecuencias, pero mejora la absorción acústica a medias frecuencias. Si bien, esta disminución ha sido más significativa al aumentar la cantidad de WHS en la muestra.
- La fase continua o matriz que embebe las partículas de WHS influye significativamente en el rendimiento acústico de las muestras. La muestra preparada con resina epoxi WHS-B-10-RESINA, presenta muy bajo rendimiento acústico y queda sin clasificación acústica según el valor obtenido de α_w . La muestra preparada con cemento, WHS-B-10-CEMENTO, alcanza valores del coeficiente de absorción acústica superiores a los de la muestra WHS-B-10 preparada con yeso, sobre todo a medias y altas frecuencias. El material WHS-B-50 preparado con yeso ha mostrado un mejor rendimiento acústico que su homóloga con cemento (WHS-B-50-CEMENTO) a frecuencias inferiores a 1 kHz y ha obtenido una clasificación acústica de D según el valor obtenido para α_w .
- En general, las muestras con mejor absorción acústica han sido aquellas preparadas solo con WHS. Sin embargo, como propuesta de estudio para futuras investigaciones, las muestras con yeso o con otros aglutinantes y ligantes tendrían la ventaja adicional de presentar mayor consistencia y resistencia mecánica e, incluso, se podrían mejorar otras propiedades térmicas como, por ejemplo, el aislamiento acústico.

REFERENCIAS

- Alabdulkarem, A., Ali, M., Iannace, G., Sadek, S., y Almuzaiqer, R. (2018). Thermal analysis, microstructure and acoustic characteristics of some hybrid natural insulating materials. *Construction and Building Materials*, 187, 185-196. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.213>
- Alarcón-Elbal, P. M. (2013). Plantas invasoras acuáticas y culícidos: un binomio peligroso. *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural*, 107, 5-15.
- Ali, M. (2016). Microstructure, thermal analysis and acoustic characteristics of calotropis procera (apple of sodom) fibers. *Journal of Natural Fibers*, 13(3), 343-352. <https://doi.org/10.1080/15440478.2015.1029198>
- Álvarez Láinez, M. L. (2007). *Propiedades térmicas, mecánicas y acústicas de espumas de poliolefina de celda abierta*, Tesis Doctoral, Universidad de Valladolid.
- Arenas, J. P., y Asdrubali, F. (2019). Eco-materials with noise reduction properties. *Handbook of Ecomaterials*, 5, 3031-3056. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68255-6_137
- Arenas, J. P., y Crocker, M. J. (2010). Recent trends in porous sound-absorbing materials. *Sound & Vibration*, 44(7), 12-17.
- Arenas, J. P., Rebolledo, J., del Rey, R., y Alba, J. (2014). Sound absorption properties of unbleached cellulose loose-fill insulation material. *BioResources*, 9(4), 6227-6240. <https://doi.org/10.15376/biores.9.4.6227-6240>
- Asdrubali, F., D'Alessandro, F., y Schiavoni, S. (2015). A review of unconventional sustainable building insulation materials. *Sustainable Materials and Technologies*, 4, 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2015.05.002>
- Berardi, U., y Iannace, G. (2015). Acoustic characterization of natural fibers for sound absorption applications. *Building and Environment*, 94, 840-852. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.05.029>
- Bhuvaneshwari, M., y Sangeetha, K. (2017). Development of water hyacinth nonwoven fabrics for thermal insulation. *Journal on Future Engineering and Technology*, 13(1), 22. <https://doi.org/10.26634/jfet.13.1.13759>
- Boubel, A., Garoum, M., Bousshine, S., y Bybi, A. (2021). Investigation of loose wood

- chips and sawdust as alternative sustainable sound absorber materials. *Applied Acoustics*, 172, 107639. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107639>
- Buratti, C., Belloni, E., Lascaro, E., Merli, F., y Ricciardi, P. (2018). Rice husk panels for building applications: Thermal, acoustic and environmental characterization and comparison with other innovative recycled waste materials. *Construction and Building Materials*, 171, 338-349. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.089>
- Carrascal García, M. T., Romero Fernández, A., y Casla Herguedas, M. B. (2016). *Guía de Aplicación del DB HR Protección Frente al Ruido, versión v.03*. Ministerio de Fomento, Gobierno de España. https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HR/GUIA_DBHR_201612.pdf
- Carrión, A. (1998). *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. UPC Ediciones. <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.3/36341>
- Casas-Ledón, Y., Daza Salgado, K., Cea, J., Arteaga-Pérez, L. E., y Fuentealba, C. (2020). Life cycle assessment of innovative insulation panels based on eucalyptus bark fibers. *Journal of Cleaner Production*, 249, 119356. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119356>
- Cayanan, N. D. C., Gozun, S. C., Tongol, E. R. M., y Bautista, L. G. (2019). Hibla: Acoustic fiber. *Proceedings of Meetings on Acoustics*, 39(1), 015002. <https://doi.org/10.1121/2.0001264>
- Chabriac, P. A., Gourdon, E., Gle, P., Fabbri, A., y Lenormand, H. (2016). Agricultural by-products for building insulation: Acoustical characterization and modeling to predict micro-structural parameters. *Construction and Building Materials*, 112, 158-167. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.162>
- Chung, J. Y., y Blaser, D. A. (1980). Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. II. Experiment. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 68(3), 914-921. <https://doi.org/10.1121/1.384779>
- Crocker, M. J. (2007). Handbook of Noise and Vibration Control. En Crocker, M. J. (Ed.), *NASA Contractor Reports*. John Wiley y Sons, Inc.
- Cuadrado-Méndez, F. J., y Domínguez-López, J. J. (2019). Teoría y técnica del sonido. *Colección Claves de la Comunicación*, Editorial Síntesis. <https://www.sintesis.com/data/indices/9788491714095.pdf>
- Čulík, M., Danihelová, A., Ondrejka, V., y Aláč, P. (2020). Sound absorption of board

- construction materials used in wooden buildings. *Akustika*, 37, 52-58. <https://doi.org/10.36336/akustika20203751>
- David, R., Shafi, K. A., V, B., y Aziz S, S. (2022). Experimental investigation of the thermal insulation properties of water hyacinth - rice straw composite materials. *Proceedings of the International Conference on Aerospace & Mechanical Engineering (ICAME 21)*, 1-2. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4102269>
- De Oliveira, K. A., Barbosa, J. C., Christoforo, A. L., Molina, J. C., Oliveira, C. A. B., Bertolini, M. S., Gava, M., y Ventorim, G. (2019). Sound absorption of recycled gypsum matrix composites with residual cellulosic pulp and expanded polystyrene. *BioResources*, 14(2), 4806-4813.
- Dhandapani, N., y Megalingam, A. (2022). Mechanical and sound absorption behavior of sisal and palm fiber reinforced hybrid composites. *Journal of Natural Fibers*, 19(12), 4530-4543. <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1863893>
- El-Wakil, A. E. A., Abd-Elbasseer, M., y M.El-Basheer, T. (2021). Mechanical and acoustical properties of eichhornia crassipes (water hyacinth) fiber-reinforced styrene butadiene rubber. *Polymer Composites*, 42(8), 3732-3745. <https://doi.org/10.1002/pc.26088>
- Elvaswer, V. F. (2015). Penentuan koefisien absorpsi bunyi dan impedansi akustik dari serat alam eceng gondok (eichhornia crassipes) dengan menggunakan metode tabung. *Jurnal Ilmu Fisika*, 7(2), 45-49. <https://doi.org/10.25077/jif.7.2.45-49.2015>
- Erickson, D., Kawahara, S., Williams, J. C., Moore, J., Suemitsu, A., y Shibuya, Y. (2014). Metrical structure and jaw displacement: An exploration. *Speech Prosody*, 2014, 300-304. <https://doi.org/10.21437/SpeechProsody.2014-48>
- Fernea, R., Manea, D. L., Plesa, L., Ierņuțan, R., y Dumitran, M. (2019). Acoustic and thermal properties of hemp-cement building materials. *Procedia Manufacturing*, 32, 208-215. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.204>
- Ferrandez-García, M. T., Ferrandez-Garcia, A., Garcia-Ortuño, T., Ferrandez-Garcia, C. E., y Ferrandez-Villena, M. (2020). Assessment of the physical, mechanical and acoustic properties of arundo donax l. biomass in low pressure and temperature particleboards. *Polymers*, 12(6), 1361. <https://doi.org/10.3390/polym12061361>
- Gliścińska, E., Kaczor, M., Milc, A., Misztela, A., Warczyk, P., y Krucińska, I. (2019). Biocomposites for Sound Absorption. *Composites Theory and Practice*, 19(3), 107-111.

- Gumanová, V., Sobotová, L., Dzuro, T., Badida, M., y Moravec, M. (2022). Experimental survey of the sound absorption performance of natural fibres in comparison with conventional insulating materials. *Sustainability*, 14(7), 4258. <https://doi.org/10.3390/su14074258>
- Guna, V., Ilangovan, M., Rather, M. H., Giridharan, B. V., Prajwal, B., Vamshi Krishna, K., Venkatesh, K., y Reddy, N. (2020). Groundnut shell/rice husk agro-waste reinforced polypropylene hybrid biocomposites. *Journal of Building Engineering*, 27, 100991. <https://doi.org/10.1016/j.job.2019.100991>
- Guna, V., Ilangovan, M., Reddy, N., Radhakrishna, P., Maharaddi, V., Jambunath, A., y Rao, A. P. (2021a). Biobased insulating panels from mulberry stems. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 36(2), 453-472. <https://doi.org/10.1177/08927057211010884>
- Guna, V., Yadav, C., Maithri, B. R., Ilangovan, M., Touchaleaume, F., Saulnier, B., Grohens, Y., y Reddy, N. (2021b). Wool and coir fiber reinforced gypsum ceiling tiles with enhanced stability and acoustic and thermal resistance. *Journal of Building Engineering*, 41, 102433. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102433>
- Hankhantod, P., Phoo-Ngernkham, T., y Krittacom, B. (2022). Microstructure and mechanical properties of gypsum board produced from water hyacinth fiber. *Materials Science Forum*, 1058, 119-126. <https://doi.org/10.4028/p-a4325q>
- Hassan, T., Jamshaid, H., Mishra, R., Khan, M. Q., Petru, M., Novak, J., Choteborsky, R., y Hromasova, M. (2020). Acoustic, mechanical and thermal properties of green composites reinforced with natural fibers waste. *Polymers*, 12(3), 654. <https://doi.org/10.3390/polym12030654>
- Hilyard, N., y Cunningham, A. (Eds.). (1994). *Low density cellular plastics—physical basis of behaviour*, Springer, London.
- Hornsby, B. W. Y., y Ricketts, T. A. (2006). The effects of hearing loss on the contribution of high- and low-frequency speech information to speech understanding. II. Sloping hearing loss. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 119(3), 1752-1763. <https://doi.org/10.1121/1.2161432>
- Hosseini Fouladi, M., Nor, M., Ayub, M., y Ghassem, M. (2012). Enhancement of coir fiber normal incidence sound absorption coefficient. *Journal of Computational Acoustics*, 20(1), 1250003. <https://doi.org/10.1142/S0218396X11004493>

- Iannace, G. (2017). The acoustic characterization of green materials. *Building Acoustics*, 24(2), 101-113. <https://doi.org/10.1177/1351010X17704624>
- ISO (1997). ISO 11654:1997. *Acoustics: Sound absorbers for use in buildings — Rating of sound absorption*, 1-7. <https://www.iso.org/standard/19583.html>
- ISO (1998). ISO 10534-2:2002. *Acoustics: determination of sound absorption coefficient and impedance in impedances tubes. Part 2: transfer-function method.*, 1-27. <https://www.iso.org/standard/22851.html>
- Jaktorn, C., y Jiajitsawat, S. (2014). Production of thermal insulator from water hyacinth fiber and natural rubber latex. *International Journal of Science*, 11(2), 31-41.
- Kang, C.-W., Lee, N.-H., Jang, S.-S., y Kang, H.-Y. (2019). Sound absorption coefficient and sound transmission loss of rice hull mat. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, 47(3), 290-298. <https://doi.org/10.5658/WOOD.2019.47.3.290>
- Kang, C. W., Oh, S. W., Lee, T. B., Kang, W., y Matsumura, J. (2012). Sound absorption capability and mechanical properties of a composite rice hull and sawdust board. *Journal of Wood Science*, 58(3), 273-278. <https://doi.org/10.1007/S10086-011-1243-5>
- Kinnane, O., Reilly, A., Grimes, J., Pavia, S., y Walker, R. (2016). Acoustic absorption of hemp-lime construction. *Construction and Building Materials*, 122, 674-682. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.106>
- Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B., y Sanders, J. V. (2006). Fundamentals of acoustics. En Bruneau, M. (Ed.), *Fundamentals of Acoustics* (4th ed.). ISTE. <https://doi.org/10.1002/9780470612439>
- Koizumi, T., Tsujiuchi, N., y Adachi, A. (2002). The development of sound absorbing materials using natural bamboo fibers. En C. Brebbia y W. de Wilde (Eds.), *High Performance Structures and Materials* (Vol. 4, pp. 157-166). WIT Press.
- Kolya, H., y Kang, C. W. (2021). Hygrothermal treated paulownia hardwood reveals enhanced sound absorption coefficient: An effective and facile approach. *Applied Acoustics*, 174, 107758. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107758>
- Lim, Z. Y., Putra, A., Nor, M. J. M., y Yaakob, M. Y. (2018). Sound absorption performance of natural kenaf fibres. *Applied Acoustics*, 130, 107-114. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.09.012>
- Liu, D. T., Xia, K. F., Yang, R. D., Li, J., Chen, K. F., y Nazhad, M. M. (2012).

- Manufacturing of a biocomposite with both thermal and acoustic properties. *Journal of Composite Materials*, 46(9), 1011-1020. <https://doi.org/10.1177/0021998311414069>
- Liuzzi, S., Rubino, C., Stefanizzi, P., y Martellotta, F. (2020). Performance characterization of broad band sustainable sound absorbers made of almond skins. *Materials*, 13(23), 1-20. <https://doi.org/10.3390/ma13235474>
- López Jiménez, J. N., y Moreno y Fuentes, J. T. (2013). *Control de Ruido con Barreras Acusticas* [Instituto Politécnico Nacional, México D.F.]. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15998525>
- Mamtaz, H., Hosseini Fouladi, M., Nuawi, M. Z., Narayana Namasivayam, S., Ghassem, M., y Al-Atabi, M. (2017). Acoustic absorption of fibro-granular composite with cylindrical grains. *Applied Acoustics*, 126, 58-67. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.05.012>
- Markiewicz, E., Slawomir, B., y Dominik, P. (2009). Polypropylene-lignocellulosic material composites as promising sound absorbing materials. *Polymer*, 54(6), 430-435.
- Marques, B., Tadeu, A., Almeida, J., António, J., y de Brito, J. (2020). Characterisation of sustainable building walls made from rice straw bales. *Journal of Building Engineering*, 28, 101041. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101041>
- Mati-Baouche, N., De Baynast, H., Michaud, P., Dupont, T., y Leclair, P. (2016). Sound absorption properties of a sunflower composite made from crushed stem particles and from chitosan bio-binder. *Applied Acoustics*, 111, 179-187. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.04.021>
- Mendoza, L. G. F., y Co, W. M. (2019). Production of thermal wall insulation from water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) and cogon grass (*Imperata cylindrica*). *IEEE Integrated STEM Education Conference (ISEC)*, 18-19.
- Ministerio de Fomento. (2019). DB HR - Protección frente al ruido. *Código Técnico de la Edificación*, 2013, 1-129.
- Mohammad, M., Nik Syukri, N. I. R., y Nuawi, M. Z. (2019). Sound properties investigation of date palm fiber. *Journal of Physics: Conference Series*, 1150(1), 012003. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1150/1/012003>
- Navacerrada Saturio, M. A., Díaz Sanchidrián, C., y Fernández, P. (2014). Characterization of a material based on short natural fique fibers. *Bioresources*, 9(2),

3480-3496.

- Nguyen, D. M., Grillet, A.-C., Diep, T. M. H., Ha Thuc, C. N., y Woloszyn, M. (2017). Hygrothermal properties of bio-insulation building materials based on bamboo fibers and bio-glues. *Construction and Building Materials*, 155, 852-866. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.075>
- Nguyen, T. T. Van, Tri, N., Tran, B. A., Dao Duy, T., Nguyen, S. T., Nguyen, T. A., Phan, A. N., Mai Thanh, P., y Huynh, H. K. P. (2021). Synthesis, characteristics, oil adsorption, and thermal insulation performance of cellulosic aerogel derived from water hyacinth. *ACS Omega*, 6(40), 26130-26139. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c03137>
- Oldham, D. J., Egan, C. A., y Cookson, R. D. (2011). Sustainable acoustic absorbers from the biomass. *Applied Acoustics*, 72(6), 350-363. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2010.12.009>
- Pachla, E. C., Silva, D. B., Stein, K. J., Marangon, E., y Chong, W. (2021). Sustainable application of rice husk and rice straw in cellular concrete composites. *Construction and Building Materials*, 283, 122770. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122770>
- Pedreño-Rojas, M. A., Morales-Conde, M. J., Pérez-Gálvez, F., y Rodríguez-Liñán, C. (2017). Eco-efficient acoustic and thermal conditioning using false ceiling plates made from plaster and wood waste. *Journal of Cleaner Production*, 166, 690-705. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.077>
- Pedroso, M., de Brito, J., y Silvestre, J. D. (2017). Characterization of eco-efficient acoustic insulation materials (traditional and innovative). *Construction and Building Materials*, 140, 221-228. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.132>
- Philip, S., y Rakendu, R. (2020). Thermal insulation materials based on water hyacinth for application in sustainable buildings. *Materials Today: Proceedings*, 33, 3803-3809. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.219>
- Rohman, M. H., Marwoto, P., y Priatmoko, S. (2022). A study of sound materials of water hyacinth (*eichhornia crassipes*) as alternative steam integrated project-based learning model (PJBL). *Jurnal Penelitian & Pengembangan Pendidikan Fisika*, 8(1), 11-22. <https://doi.org/10.21009/1.08102>
- Salas-Ruiz, A., y Barbero-Barrera, M. del M. (2019). Performance assessment of water

- hyacinth–cement composite. *Construction and Building Materials*, 211, 395-407. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.217>
- Salas-Ruiz, A., del Mar Barbero-Barrera, M., y Ruiz-Téllez, T. (2019). Microstructural and thermo-physical characterization of a water hyacinth petiole for thermal insulation particle board manufacture. *Materials*, 12(4), 560. <https://doi.org/10.3390/ma12040560>
- Samsudin, E. M., Ismail, L. H., y Kadir, A. A. (2016). A review on physical factors influencing absorption performance of fibrous sound absorption material from natural fibers. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(6), 3703-3711.
- Seddeq, H. S. (2009). Factors influencing acoustic performance of sound absorptive materials. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 3(4), 4610-4617.
- Setyowati, E., Hardiman, G., y Grafiana, N. F. (2021). The acoustical performance of water hyacinth based porous-ceramic compared to the biomass fiber composites for architecture application. *Civil Engineering and Architecture*, 9(1), 139-149. <https://doi.org/10.13189/cea.2021.090112>
- Setyowati, E., Yahya, I., Supriyo, E., Romadhona, I. C., y Minardi, A. (2018). On the sound absorption improvement of water hyacinth and coconut husk based fiber reinforced polymer panel. *MATEC Web of Conferences*, 159. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201815901004>
- Seybert, A. F. (1980). *Notes on absorption and impedance measurements*. University of Kentucky. <https://docslib.org/doc/1146541/notes-on-absorption-and-impedance-measurements>
- Sharma, A., Singh, P. K., y Sharma, V. K. (2021). Analysis on WH cement composite thermal insulation material for increasing efficiency of building. *Materials Today: Proceedings*, 45, 3036-3041. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.056>
- Singh, S., Maiti, S., Bisht, R. S., Balam, N. B., Solanki, R., Chourasia, A., y Panigrahi, S. K. (2022). Performance behaviour of agro-waste based gypsum hollow blocks for partition walls. *Scientific Reports*, 12(1), 1-16. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-07057-y>
- Sruti, N. M. K. S., Jenaneswari, P. R., Rahayu, M. R., y Syamani, F. (2021). Utilization of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) and corncob (*Zea mays*) in epoxy-based biocomposite board for cool box thermal insulation material. *IOP Conference Series*:

Earth and Environmental Science, 891(1), 012001. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/891/1/012001>

Sukhawipat, N., Saengdee, L., Pasetto, P., Junthip, J., y Martwong, E. (2022). Sustainable rigid polyurethane foam from wasted palm oil and water hyacinth fiber composite—a green sound-absorbing material. *Polymers*, 14(1), 201. <https://doi.org/10.3390/polym14010201>

Sukhawipat, N., Yingshataporn-A-Nan, T., Minanandana, T., Puksuwan, K., Saengdee, L., Nakaramontri, Y., Sosa, N., y Saetung, N. (2021). Effects of water hyacinth fiber size on sound absorption properties of advanced recycled palm oil-based polyurethane foam composite. *Materials Today: Proceedings*, 52, 2409-2413. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.417>

Téllez, T. R., López, E., Granado, G., Pérez, E., López, R., y Guzmán, J. (2008). The water hyacinth, *eichhornia crassipes*: An invasive plant in the Guadiana river basin (Spain). *Aquatic Invasions*, 3(1), 42-53. <https://doi.org/10.3391/ai.2008.3.1.8>

Tie, T. S., Mo, K. H., Putra, A., Loo, S. C., Alengaram, U. J., y Ling, T.-C. (2020). Sound absorption performance of modified concrete: A review. *Journal of Building Engineering*, 30, 101219. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101219>

Wan, L. M., Azmi, M. N., Zainulabidin, M. H., Kassim, A. S. M., y Aripin, A. M. (2016). Framework study of acoustical characteristics of reinforced natural fibers. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(14), 8573-8578.

Wang, T. Q., y Yang, Z. G. (2004). Scattering of plane wave from moving body underwater with finite impedance surface. *Journal of Sound and Vibration*, 273(4-5), 969-987. [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(03\)00515-7](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(03)00515-7)



CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

La investigación llevada a cabo en esta tesis doctoral nació con el objetivo principal de investigar las propiedades térmicas y acústicas de materiales elaborados a partir del tallo del jacinto de agua (WHS), tanto de forma individual como en combinación con otros materiales, para evaluar su posible uso en construcción. Para alcanzar este objetivo, primero se llevó a cabo una revisión sistemática de literatura para identificar e integrar el conocimiento existente sobre las propiedades térmicas y acústicas de diversas biomásas de origen vegetal utilizadas en la industria de la construcción, o sus materiales compuestos. A continuación, se realizó un estudio empírico en el que se aplicaron métodos de moldeo con y sin prensado bajo diferentes cargas, a temperatura ambiente.

La **revisión sistemática** de la literatura (capítulo 2) sobre el uso de biomásas de origen vegetal en la preparación de materiales aislantes térmicos y acústicos dirigidos a su empleo en la construcción ha revelado que algunas biomásas, como la madera o el cáñamo, han sido ampliamente investigadas. Sin embargo, otras como el jacinto de agua, han recibido menor atención por parte de los investigadores, a pesar de ser muy abundantes en la naturaleza y de que, en muchos casos (como ocurre también en el caso del jacinto de agua) su gestión y eliminación constituyen un problema social, medioambiental o económico. Esta laguna en la literatura justifica la relevancia de la investigación llevada a cabo, continuando la labor iniciada por otros investigadores. En concreto se revisaron de forma sistemática 354 artículos, 172 de los cuales estudian las propiedades térmicas de los materiales biomásicos pero no las acústicas, 105 estudian propiedades acústicas, pero no las térmicas, y solo 77 analizan tanto las propiedades térmicas como las acústicas. La mayoría de las investigaciones se han centrado en muestras que consisten en paneles elaborados a partir de fibras o partículas de biomasa, obtenidas principalmente mediante procesos de moldeo. Para la elaboración de los materiales se han utilizado diversos aglutinantes, siendo los más estudiados la resina urea-formaldehído, el acetato de polivinilo (PVA), el ácido poliláctico (PLA) y el almidón de maíz. La revisión también permite concluir que hasta ahora se han obtenido valores muy bajos de conductividad térmica utilizando, por ejemplo, materiales híbridos basados en cáñamo y cemento; mientras que, en el caso de las propiedades acústicas, se han obtenido valores comparables en cuanto a la capacidad de absorción de sonido y la eficacia en la reducción del ruido a aquellos obtenidos con materiales disponibles en el mercado.

La **obtención de los materiales** presentados en esta tesis doctoral (capítulo 3) se ha logrado mediante el proceso de compactación en moldes y a temperatura ambiente. Específicamente se han preparado y analizado unas 80 muestras en distintos formatos o

combinaciones, formas y tamaños. Este proceso ha implicado la creación y adaptación de moldes específicos con el fin de obtener muestras que se ajustaran, en su mayoría, a las necesidades de las técnicas de caracterización.

El análisis de las **propiedades térmicas** (capítulo 4) de los materiales preparados reveló la influencia de tres variables: el tamaño de partícula, la carga aplicada en la compactación de la muestra y el contenido de WHS para el caso de los compuestos a base de WHS y yeso. En concreto, los resultados ponen de manifiesto que la influencia del tamaño de partícula varía según la magnitud de la carga aplicada en la compactación de las muestras, y que las muestras preparadas exclusivamente con partículas de WHS compactadas muestran menor conductividad térmica a medida que se elevan las cargas de compactación, aunque estas relaciones dependen del tamaño de partícula. En cambio, para las muestras preparadas a base de WHS y yeso, aquellas en las que se empleó mayor carga controlada durante el moldeo presentaron mayor conductividad térmica. Además, de manera general, se observa que un mayor contenido de WHS conduce a menores conductividades térmicas con respecto a los valores obtenidos para el yeso sin WHS. Finalmente, la incorporación de ligantes adicionales, como la cola blanca y el almidón de maíz, o la combinación con otros materiales constructivos, como el cemento o la resina epoxi, resulta en un aumento de la conductividad térmica.

La **caracterización acústica de materiales** (capítulo 4) permite concluir que las propiedades acústicas están influenciadas fundamentalmente por cuatro variables: el tamaño de partícula, la carga aplicada en la compactación de la muestra, el contenido de WHS para el caso de los compuestos a base de WHS y yeso, y el espesor de la muestra. En general, independientemente de la carga aplicada, las muestras preparadas con las partículas de WHS más grandes fueron las que mostraron una mayor capacidad de absorción acústica. Así mismo, al aumentar el grado de compactación se observa una disminución de la absorción acústica, tanto en las muestras preparadas íntegramente de partículas de WHS como en aquellas preparadas con WHS y yeso. También se puede concluir que, en la mayoría de los casos, un aumento en el contenido de WHS en las muestras compuestas a base de yeso resultó en una mayor capacidad de absorción acústica, y que un incremento en el contenido de WHS conlleva un desplazamiento significativo del pico de absorción acústica hacia frecuencias más bajas, sin importar el tamaño de las partículas. Además, mayores espesores en las muestras mejoran su capacidad de absorción acústica, y esta mejora se acentúa en el caso de las muestras con una mayor cantidad de partículas de WHS. Finalmente, la inclusión de un ligante adicional, como la cola blanca o el almidón, o la incorporación de otros materiales como la resina o el cemento, ha resultado en una merma de las propiedades de absorción acústica.

El **estudio comparativo de las condiciones que ofrecen mejor comportamiento tanto térmico como acústico** permite concluir que las muestras preparadas con WHS y mayor tamaño de partícula presentan menores valores de conductividad térmica, pero mayores valores de absorción acústica y el coeficiente de reducción de ruido (NRC). Además, los resultados de este estudio permiten concluir que para minimizar la conductividad térmica de los materiales preparados con partículas de WHS compactadas se deberán fabricar siempre con pequeños tamaños de partícula, mientras que para maximizar la absorción acústica en las muestras se deberían emplear los mayores tamaños de partícula y considerar elevados espesores de la muestra como se ha demostrado en el capítulo 5. Por lo tanto, para llegar a un material con buenas propiedades térmicas y acústicas, deberemos tomar las muestras con un tamaño de partícula intermedio (0,5-1 mm). El uso de ligantes como el almidón de maíz o la cola de madera durante la conformación de los materiales basados solo en WHS influye negativamente en sus propiedades aislante, aumentando la conductividad térmica o disminuyendo la absorción acústica. Los materiales preparados con cola para madera son los que han presentado los menores valores de absorción acústica.

En cuanto a las muestras preparadas a base de biomasa y yeso, la adición de WHS al yeso disminuye la conductividad térmica del material, siendo esta disminución más acusada a medida que aumenta la cantidad de WHS, hasta un límite que parece depender del tamaño de partícula. Al añadir WHS al yeso también se observa una mejora de las propiedades de absorción acústica del yeso a bajas, medias y altas frecuencias. A medida que aumenta la cantidad de WHS en la muestra de yeso, el máximo de la absorción se desplaza a menores frecuencias, lo cual indica que el tipo y la cantidad de partículas de WHS que deben añadirse al yeso dependen del rango de frecuencias que se deseen absorber.

Finalmente, los materiales compuestos a base de cemento y WHS han presentado mejores valores en las propiedades acústicas pero los peores en términos de conductividad térmica. Los materiales compuestos a base de resina epoxi, han mostrado un comportamiento contrario al cemento (baja conductividad térmica y muy baja absorción acústica). Los materiales a base de yeso y WHS presentan valores intermedios en las propiedades con respecto al yeso y cemento.



ANEXOS



ANEXO 1

TABLA DE REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Anexo 1: Tabla de revisión bibliográfica

Author/s (Year)	Materials analysed	Sample preparation	Parameters analysed	Materials	Main findings/Conclusions
Gibson (1930)	Panels	Pressing moulding	MeP, ThP	<i>BioF</i> : wheat straw (pulped by digestion) Old newspapers (5-10%) Water, alum and resin	TS: 340-385 PSI; MOR: 230 PSI; TC: 0.32-0.324 Btu inch per second per square foot per °F. Boards made from wheat straw could be used as ThI material (e.g., for ovens or buildings), and as AI material (e.g., for auditoriums).
Sampathrajan et al. (1991)	Panels	Hot pressing	AP	<i>BioF</i> : coconut pith or paddy straw, groundnut shell, maize cob, maize husk <i>BI</i> : UF-resin	SA: 0.18-0.69; NCR: 0.39-0.54; SRI: 1.90-68.94 dB; Attenuation factor: 1.19-75.89 (x10 ²) dB/m; DM: 3-16.33 GPa; LM: 36.9-141.4 MPa; AR: 33.6-101.6 kPa/s. Particleboards made from BioF listed in the Materials' cell showed high SIN as LM increased. Particleboards made from paddy straw as filler showed the highest NRC and the lowest DM and LM. Particleboards prepared with maize husk and maize cob as filler showed the highest values of attenuation factor and DM. Particleboards made from groundnut shell and coir pith as filler showed the best SIN.
Sellers et al. (1993)	Panels	Hot pressing	AP, HyP, MeP, ThP	<i>BioF</i> : kenaf particles <i>BI</i> : PF-resin	IB: 110-214 kPa; MOR: 683-1200 kPa; MOE: 0.186-0.420 GPa; WA: 119%-123% (2 h), 246%-325% (24 h); ST: 12%-23% (2 h), 17%-28% (24 h); TC: 0.061-0.065 W/mK; SA: 0.07-0.26. The panels made from kenaf particles and PF-resin could be used for SA and ThI products.
Yang et al. (2003)	Panels	Hot pressing	AP, HyP, MeP, PhP	<i>BioF</i> : wood particles and rice straw <i>BI</i> : UF-resin	MC: 7.28%-9.53%; SG: 0.35, 0.57, 0.79; The higher rice straw particle length, the higher MOR: 0.965-1.9995 MPa; SA: the highest values for boards with 0.4 and 0.6 of SG. Boards made from rice straw, wood and UF-resin with a SG of 0.8 showed the highest MOR values. The rice straw could replace wood particles at up to 20 wt.% without reducing MOR. Boards with SG of 0.4 and 0.6 were suitable to SA.

Xu et al. (2004)	Particulate samples	Hot-pressing moulding	AP, HyP, MeP, ThP	BIO: kenaf	MOR: 1.0 MPa; MOE: 0.3 GPa; IB: 0.10 MPa; ST: 6.6%; WA: 355%; TC: 0.040-0.065 W/mK; SA: 0.02-0.64. The low-D binderless particleboards made from kenaf showed suitable MeP and dimension stability. TC values obtained for particle boards made from kenaf were similar to those for rock wool-based panels, while SA values were similar to those of an insulation board. The low-D binderless particleboards made from kenaf could be used in construction to both ThI and SIN.
Kawasaki y Kawai (2006)	Panels	N/S	HyP, PhP, ThP	BioF: wood BI: MDI-resin	D: 260-690 kg/m ³ ; TC: 0.062-0.14 W/mK; R-Value: 0.73-16 W/m ² K; TR: 7.0-16 mK/W; R-value: 0.063-1.4 m ² K/W; VHC: 390-1000 kJ/Km ³ ; TD: 0.00046-0.00057 m ² /h. The wood-based sandwich panels of plywood-faced low-D fibreboard core with polymeric MDI-resin showed as good ThP as commercial ThI (e.g., EPS or extruded PS).
Binici et al. (2007)	Structural elements	Moulding	MeP, ThP	BioF: straw Other filler: plastic fibre, PS fabric BI: clay, cement, basaltic pumice and gypsum	TC: 0.235-0.356 W/mK; CS: 2-6.7 MPa; CS of clay plus plastic fibre composites was 22% higher than clay plus straw composites, and 32% higher than clay plus PS fabric composites. The fired bricks made from clay, cement, basaltic pumice and gypsum as stabilisers and plastic fibre, straw and PS fabric as fibrous materials showed CS values in accordance with ASTM standards (0.5-1 MPa). Composite made from basaltic pumice showed the lowest TC. TC variations of fired bricks showed a similar trend to their D variation and bricks with low D prevented energy loss from buildings.
Aamr-Daya et al. (2008)	Panels	Moulding	MeP, PhP, ThP	BioF: flax waste particles BI: cement	DME: 4.3-26 GPa; CS: 10.5-65 MPa; MOR: 2.3-5.8 MPa; Maximum temperature of cement hydration: 23-31.3 °C; Air-entrainment: 8%-17%; CS loss per air-entrainment: 1.8%-6.3%. The incorporation of flax in cementitious matrix inhibited cement hydration set and favoured air-entrainment in the matrix, which reduced the DME, which showed a high level of SIN. The porous structure of the composite could give a high degree of ThI. The composite made from flax waste particles and cement could be used in civil construction.

Anexo 1: Tabla de revisión bibliográfica

Bánhidi y Gömze (2008)	Panels	Moulding	MeP, ThP	<i>BioF</i> : sawdust, rice-peel, sunflower seed-shell <i>BI</i> : clay	TC: decreased 10%-31% with the incorporation of 4% of additives and 16%-37% with the incorporation of 7% of additives; CS: decreased 26%-77% with the incorporation of 4% of additives and 25%-48% with the incorporation of 7% of additives. The incorporation of sawdust, rice-peel, seed-shell in clay improved the ThP of the bricks but decreased their MeP.
Huda y Yang (2009)	Panels	Pressing	AP, MeP, PhP	<i>BioF</i> : cornhusks <i>BI</i> : PP	MOR: 5.6-8.2MPa; MOE: 501- 642MPa; IR: 33.8-65.5J/m; TS: 5.6-7.1MPa; E: 412-551 MPa; NRC: 0.10-0.16. The composites made from cornhusks and PP showed higher NRC and lower MeP than composites made from jute and (PP). MOE and IR increased when the content of cornhusks increased up to 55 wt.%. MeP increased with increasing inner void content.
Markiewicz et al. (2009)	Panels	Hot-pressing moulding	AP	<i>BioF</i> : hemp, flax, rapeseed straw, and beech wood <i>BI</i> : PP	SA: 2%-30%. The incorporation of lignocellulosic material in PP increased SA in the frequency above 3000 Hz. The composites made from PP and lignocellulosic from plants (hemp, flax, straw and beech wood) could be used in the automotive industry and building due to their AP. The composite made from PP and long flax fibres showed the highest SA at 3000 Hz.
Aisenbrey y Frommann (2010)	Panels	Hot-pressing moulding	AP, MeP, PhP	<i>BioF</i> : hemp, jute/flax fibres <i>BI</i> : epoxy resin, PP	MOR increased from 90 to 140 MPa with the increased of the jute content; Maximum SRI: 55 dB; SA increased to high frequencies. The composites made from natural fibres, epoxy resin and PP matrix showed good SIN and SA; hence, they could be used in architectural acoustics and the automobile industry. The composites made from epoxy resin as matrix showed the highest values of MOE and MOR.
Cosereanu et al. (2010)	Structural elements	Pressing moulding	ThP	<i>BioF</i> : wood flakes or fibres, jute, wheat flour <i>Other filler</i> : wool <i>BI</i> : clay, ecological acrylic copolymers	D: 0.202-1.194 kg/m ³ ; TC: 0.047-0.119 W/mK; R-value: 0.12-0.81 m ² K/W; Equivalent R-value: 0.29-0.98 m ² K/W; Heat flux: 1.30-4.44 W. The structures made from wood, wool and ecology acrylic copolymer, and from wood, wool and clay showed the best ThP.
Etuk et al. (2010)	Particulate samples	Pressing moulding	PhP, ThP	<i>BIO</i> : Zea mays straw, Zea mays heart	BD: 179.05-840.02 kg/m ³ ; TC: 0.040-0.093± W/mK; SHC: 1754.92-2097.040 J/kgK; TD: 1.094-5.792 m ² /s (x10 ⁻⁷); Thermal Absorptivity: 16.392-26.612 m ⁻¹ . Both boards made from Zea

					mays straw and Zea mays heart showed satisfactory ThP, but those made from Zea mays heart showed better ThP.
Ghos et al. (2010)	Panels	Hot-pressing moulding	AP, HyP, MeP, ThP	<i>BioF</i> : date palm leaf, jute sticks and sawdust <i>BI</i> : UF-resin	TS: maximum for samples with date palm leaf jute and minimum for samples with sawdust; SRI: highest value observed in sawdust board. Particleboards made from date palm leaf and jute sticks showed the best IST values. As the jute sticks content increased, SRI and ThI behaviour increased. Particleboards made from jute sticks showed the highest ThP. Particleboards made from date palm leaf and jute sticks showed lower ST.
Nguyen et al. (2010)	Panels	Moulding	MeP, ThP	<i>BioF</i> : hemp shives <i>BI</i> : lime	TC: 0.363-0.373 W/mK; CS: 3.9-10 MPa; The higher CS and TC, the higher AD and CS. The compacting process employed to obtain composites made from hemp shives and lime-based improved CS but showed a slight increase in TC. The higher AD, the higher CS and TC.
Ramis et al. (2010)	Raw materials	N/S	AP, PhP	<i>BIO</i> : kenaf fibres	BD: 47-132 kg/m ³ ; FR: 4045-20598 Pa·s/m ² ; SA: 0.039-1.256. Kenaf fibres showed excellent SA and FR values similar to those reported for porous sound absorbing material used to SIN.
Vasilache et al. (2010)	Raw materials	Raw material	ThP	<i>BIO</i> : sawdust <i>Waste materials</i> : crumbled EPS and hacked paper	HFR: 0.424-0.504 W (crumbled EPS), 0.435-0.530 W (shredded paper), 0.450-0.576 W (sawdust); TC: 0.0446-0.0545 W/mK (crumbled EPS), 0.0631-0.0705 W/mK (shredded paper), 0.0441-0.0712 W/mK (sawdust). Waste materials (sawdust, crumbled EPS and hacked paper) showed low TC values; hence, they could be used as ThI materials in the construction.
Zhou et al. (2010)	Particulate samples	Hot-pressing moulding	MeP, ThP	<i>BIO</i> : cotton stalk fibres	D: 150-450 kg/m ³ ; TC: 0.0585-0.0815 W/mK. Fibreboards made from cotton stalk fibres showed good TC, hence, they could be used as excellent ThI in construction. The MC and pressing time did not significantly affect the TC, but IB, MOR and MOE were improved with increasing MC and pressing time.
Zou et al. (2010)	Panels	Hot-pressing moulding	AP, MeP, PhP	<i>BioF</i> : switchgrass stems, jute fibre <i>BI</i> : PP	Void content: 19.8%-23.9%, decreased as the concentration of switchgrass stem increased from 40% to 70%; BD: 420-510 Kg/m ³ ; SA: the composites with big switchgrass stem showed higher values than with small stem; SA: good values at

					frequency below 1.5 kHz. Composites made from PP and switchgrass stems showed 56% higher MOR, 19% higher MOE, 15% higher IR, 63% higher E, 52% lower TS and similar SA than composites made from jute fibre and PP. The composites could be used in automotive interiors, in the construction or such as office panels.
Bratu et al. (2011)	Panels	N/S	AP	<i>BioF</i> : wood chips, sawdust <i>Other filler</i> : pellets from plastic bottles, furnace slag, sterile municipal waste, and PS <i>BI</i> : UP-resin and UF-resin	Maximum SA: 0.75 (wood chips), 0.5 (pellets from plastic bottles), 0.9 (furnace slag), 0.8 (sterile municipal waste), 0.9 (sawdust), 0.8 (PS waste). Composites made from furnace slag, sterile municipal waste or sawdust as filler in UF-resin matrix showed the best SA properties.
Chu-wang et al. (2011)	Particulate samples	N/A	AP	<i>BIO</i> : Mytilaria laosensis sheet	SA was 0.15 higher in variable cross section structure than of pore-tank structure. SA of small pores was higher than that obtained for larger pores at 100-300 Hz (low frequencies). Fibreboard made from Mytilaria laosensis sheet as veneer board, and medium D fibreboard as base material showed low SA values. Similar fibreboard but using a microperforated layer structure showed higher SA values than the fibre board without the microperforated layer.
El Hajj et al. (2011)	Particulate samples	Pressing moulding	AP, HyP, MeP, PhP, ThP	<i>BIO</i> : flax fibres and flax shaves	D: 170-225 kg/m ³ ; MOR: 0.15-0.25 MPa; TC: 0.065-0.1W/mK; SA: >0.5; MAB: 15%; Morphology: presence of an organic gel that sheath the flax and provided a link between the fibres. The higher flax size, the lower MOR and TC, and the higher SA. The green composites made from flax fibres and flax shaves showed good ThP and AP, hence, they could be used into sandwich panels in combination with materials more mechanically resistant.
Fernandes et al. (2011)	Panels	Pressing moulding	AP, HyP, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : cork powder <i>BI</i> : HDPE and PP homopolymer	WA: 3.7%-14.8%; ST: 0.5%-0.8%; D: 1017.5-1060.6kg/m ³ ; MOR: 17.1-19.1MPa; IST: 5.53-6.49 kJ/m ² ; TGA: onset temperature: 282-289 °C, Weight loss: 5.81%-12.21%; SRI: 18-20 dB. Composites boards made from cork powder and PP, or cork powder and HDPE showed low WA, FIR, IR and insulation properties. Therefore, they could be used on floor applications.

Anexo 1: Tabla de revisión bibliográfica

Glé et al. (2011)	Panels	N/S	AP, PhP	<i>BioF</i> : hemp shiv <i>Bl</i> : lime, cement	D: 310-420 kg/m ³ ; Porosity: 67%-75%; FR: 11000-73000 Nm ⁻⁴ s; SA: as the BI content increased, porosity and SA decreased. Composites made from hemp shiv showed higher porosity and satisfactory SA values. The higher porosity, the higher SA. Composites with the highest content of hemp showed the largest SA values.
Hosseini Fouladi et al. (2011)	Particulate samples	Pressing moulding	AP	<i>BIO</i> : coir fibre	FR: 1395-1618 (fresh coir fibre), 4566-6298 (mixed with BI) Nsm ⁻⁴ ; Porosity: 70%-89% (fresh coir fibre), 70%-76% (mixed with BI); SA: 0.8 at >1360 (20 mm), >940 (30 mm), >578 (45 mm) Hz. Samples with coir fibre and BI showed lower SA than fresh coir fibre.
Karademir et al. (2011)	Panels	Pressing	AP, ChP, MeP, Optical and printing properties, ThP	<i>BioF</i> : luffa fibres Other: old corrugated boards and yarn waste	MeP decreased with the addition of yarn waste and luffa fibres in samples; TGA: sharp weight loss at 290-480 °C; the addition of luffa fibre and yarn waste improved the SA values. Luffa fibre and yarn waste in sheets made from old corrugated boards improved the brightness and opacity of samples, showing excellent TStb, high porosity development and adequate air permeability. The most porous sheets showed more changes in print D and tone values. But the most porous sheets improved the SA and they could be used in boards to SIN.
Kim et al. (2011)	Structural elements	N/S	ThP	<i>BioF</i> : larch <i>Bl</i> : gypsum	Maximum temperature difference among layers: 4.1-6 °C; TC: 0.29-0.30 W/mK; TT: 0.10-0.15 W/m ² K. Green timber wall system exhibited higher insulation performance than gypsum board wall system. Thick wall systems showed higher insulation performance than thin wall systems.
Korjenic et al. (2011)	Particulate samples	Hot pressing	HyP, MeP, PhP, ThP	<i>BIO</i> : jute, flax and hemp	BD: 26.1-82.1 kg/m ³ ; TC: 0.0393-0.0486 W/mK; Diffuse resistance factor (μ -value): 2.1-4; Tension at 10% deformation: 0.4-11.2 kPa; TS: 6.25-23.47 kPa; MC: 1.176-1.797 kg/kg. The higher MC, the higher TC. TC and MeP were quite similar to common insulating boards properties (e.g. mineral wool, PS or PU).
Panyakaew y Fotios (2011)	Particulate samples	Hot pressing moulding	HyP, MeP, ThP	<i>BIO</i> : coconut husk and bagasse	MOR: maximum 0.12-4.16 MPa; MOE: maximum 88-957 MPa; IB: 0.002-0.014 MPa; ST: minimum 21.7%-42.7% (exceed the maximum permitted for insulation boards: 10%); TC: 0.046-

					0.068 W/mK. MeP (MOR, MOE and IB) of binderless ThI boards made from coconut husk and bagasse increased when D, pressing time and temperature were increased. Boards made from coconut showed greater water stability than boards obtained from bagasse. Boards showed similar TC than conventional insulation materials (e.g., cellulose fibre or mineral wool). Boards made from bagasse with a D of 350 kg/m ³ showed the best MeP and ThP, therefore, they could be used as building materials for ThI.
Pinto et al. (2011)	Particulate samples	Moulding	ChP, PhP, ThP	BIO: corn's cob	Corn's cob was a heterogeneous material while extruded PS was homogeneous and presented much more regular and uniform shape of its closed cellular structure; Chemical elements detected in samples: O, Mg, Al, Si, K, Ca, and Fe; The corn's cob showed good ThP and could be used as ThI material for partition walls.
Rao et al. (2011)	Particulate samples	Extrusion and forming	AP, Energy absorbed, MeP	Core: sisal fibre (BIO filler) and PP (BI) External layer: wood fibre	In-plane compressive properties: average CS: 0.2 MPa, average CM: 2.0 MPa; Out-of-plane compressive properties: average CS: 8.7 MPa, average modulus: 269.0 MPa; Modulus in compression: 1.73-1.82 (x10 ⁶) Nm/kg; Specific strength: 52.56-56.04 (x10 ³) Nm/kg; Maximum SA of cores: 0.05; Maximum SA of sandwich panels: 0.95. The addition of wood fibres in the core cavities of the honeycomb cores samples made from sisal fibres and PP improved the SA. Honeycomb cores samples showed an excellent kinetic energy absorbed and high MeP enhancing their applicability in building walls, packaging, automobile, aircraft and naval industries.
Udoeyo et al. (2011)	Panels	Moulding	AP, HyP, MeP, ThP	BioF: palm nut fibre and palm kernel shell BI: cement	MOR: 0.26-10.132 MPa; IST: 0.505-0.659 J; SA: maximum in specimens with 10 wt.% of palm nut fibre, and 60 wt.%-80wt.% of palm kernel shell, minimum in specimens with 2 wt.% of palm nut fibre, and 20 wt.% of palm kernel shell; WA: the specimen with 2 wt.%-8 wt.% of palm nut fibre and 20 wt.% of palm kernel shell showed 7.5%-10% WA that was the maximum recommended by ASTM C473. The higher palm nut fibre and

					palm kernel shell content, the lower MOR and TD, and the higher ST, WA and SA. Composite made from a 20 wt.% of palm kernel shell and between the 2 wt.% and the 6 wt.% of palm nut fibre could be used for ceiling or sheathing board.
Díaz et al. (2012)	Raw materials	Mounted	AP	<i>BIO</i> : reed	Surface D: 8-40 kg/m ² ; SRI: 28-43 dB. Reed boards showed adequate SA values at high and medium frequencies; hence these samples could be used as backing, floating ceilings, or suspended absorbers. The higher thickness, the higher SA at medium and low frequencies. The use of reed boards with wood panels and asphalt membranes improved SRI.
Faustino et al. (2012)	Panels	Moulding	AP	<i>BioF</i> : corn cob <i>BI</i> : wood glue	Average impact noise levels: 52.0-69.2 dB (without panel), 25.2-53.3 dB (with panel); Reverberation time: 1.12-3.04 s; Estimated impact SIN values: 44.9-64.6 dB (without panel), 21.6-47.3 dB (with panel). Applying corn cob-based panels was improved SIN capacity of the building. Particleboard could be an alternative to the traditional impact sound products such as glass wool and EPS.
Hosseini Fouladi et al. (2012)	Raw materials	N/S	AP, PhP	<i>BIO</i> : coir fibre	Average D: 821 kg/m ³ ; BD: 87-98.7 kg/m ³ ; Thermal characteristic length: 267-269 μm; Porosity: 88%-89%; Tortuosity: 1.06-1.07; SA: 0.026-0.987. The good combination of a reasonable thickness of fibre and air gap layers improved the SA. An increased of the air gap in samples improved SA values at low frequencies but values were decreased at medium-high frequencies.
Huda et al. (2012)	Panels	Pressing moulding	AP, MeP	<i>BioF</i> : fine bamboo strips <i>BI</i> : PP web	MOR: 5.0-23.3 MPa; MOE: 128-31 GPa; NRC: 0.10-0.15. Composites made from fine bamboo strips and PP web showed high flexural properties (MOE, MOR). Bamboo could be a substitute for wood and non-environmentally friendly and non-recyclable materials (e.g., fiberglass and PU). Composites made from fine bamboo strips and PP web showed high MOE and AP at low D.
Kain et al. (2012)	Panels	Hot pressing	HyP, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : pine, spruce and fir barks <i>BI</i> : UF-resin	BD: 168.8-212.7 kg/m ³ ; CS: 1.719-1.958 MPa; MOR: 0.65-0.87 MPa; MOE: 0.136-0.185 GPa; TS: 0.48-0.71 MPa; IB: 0.12-0.16 MPa; ST: 0.11-0.16 mm/mm; WA: 0.34-0.64 kg/kg; TC: increased

					0.011 W/mK with every 100 kg/m ³ of additional D. Panels made from pine, spruce, fir barks and UF-resin showed high TC due they high D, but CT values were in a good range to consider these panels as insulating material.
Kang et al. (2012)	Panels	Hot-pressing moulding	AP, HyP, MeP	<i>BioF</i> : rice hull, larch wood sawdust <i>BI</i> : PF-resin	MC: 3.24%-5.13%; MOR: 1.5-9.3 MPa; Hight SA at high frequencies. Particleboards made from rice hull, sawdust and PF-resin showed lower MeP than other wood-based materials. The higher rice hull content, the lower D, and the higher SA. Particleboards showed high SA than ceramic tiles, wooden floor and concrete. Particleboards could be used as sound absorbing materials in construction but were limited in application to non-structural applications.
Karlinasari et al. (2012a)	Panels	Hot-pressing moulding	AP, PhP	<i>BioF</i> : Betung bamboo particles <i>BI</i> : MDI-resin	BD: 410-700 Kg/m ³ ; SRI: 15-25 dB; STC at 500 Hz: 7, 9, 15, 18; SA: peak at 125 and 200 Hz, < 0.4 at 250-800 Hz. The low-D particleboards made from Betung bamboo particles and MDI-resin showed higher SA values than those obtained for medium-D particleboards although the latter were effective as insulation boards due to its high SRI and STC.
Karlinasari et al. (2012b)	Panels	Hot pressing moulding	AP, HyP, MeP, PhP	<i>BioF</i> : tropical fast-growing species (sengon, manii and acacia) <i>BI</i> : MDI-resin	D: 460-730 Kg/m ³ ; MC: 9.65%-10.43%; MOR: 5.1-15.2 MPa; IB: 0.3-0.8 MPa; SA: <0.4 at 250-800 Hz – maximum of 0.9 at 2000 Hz. The particleboards made from tropical fast-growing species (sengon, manii and acacia wood) and MDI-resin showed good SA at low and high frequency range. The low-D particleboards showed the best SA values at high frequency while medium-D particleboards showed the best SA values at low frequency. Particle board prepared in this work could be used as commercial products for acoustic in construction.
Kumfu y Jintakosol (2012)	Panels	Hot pressing moulding	HyP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : pineapple leaf fibre <i>BI</i> : rubber latex	D: 338-429 kg/m ³ ; MC: 10.75%-12.13%; WA: 29.24%-108.12%; ST: 7.47%-13.24%; TC: 0.057-0.071 W/mK. Boards made from mixtures of pineapple leaf fibre and natural rubber latex showed, in general, low TC values. These samples could be used as insulating board to energy conservation in building.

Liu et al. (2012)	Panels	Steam injection moulding	AP, HyP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : pine Wood fibres and rice straw <i>BI</i> : PU and acetone	D: 80-130 kg/m ³ ; TC: rice straw showed lower values than wood fibres; TD: 2.9x10 ⁻⁷ -4.75x10 ⁻⁷ m ² /s; TStb: exothermic reaction at 25 min and 280 °C, endothermic reaction at 35 min and 350 °C, decomposition rate peak of -6.28%/min at 28.9 min; SA: high values at 250-7000 Hz, the high thickness shifted the maximum SA to lower frequency; Dimensional stability: adequate due its thickness changes which remained below 2.5%; Maximum MAB: 8.5%. Biocomposites prepared from pine wood fibres, rice straw, PU and acetone showed good ThP and SA performance. Biocomposites showed high R-Value at low D and, therefore, could be used as insulation materials in buildings.
Paiva et al. (2012)	Panels	N/S	ThP	<i>BioF</i> : corn cob <i>BI</i> : extruded PS	TT: 0.95-2.14 W/m ² K; TC estimate: 0.101 W/mK. Particleboards composed by a panel made from extruded PS and a corn cob panel exhibited low TT values. Particleboards showed low ThI performance compared to extruded PS foam and EPS.
Pinto et al. (2012a)	Raw materials	N/S	ChP, HyP, PhP, ThP	<i>BIO</i> : corn cob	Microstructure: the central layer presented a regular alveolar microstructure with interesting regular geometric shape; D: 170-297.78 kg/m ³ ; WA: 258%-392%; FIR: flaming, combustion and gas emission; Time for total combustion: 5 min; TT: 1.89 W/m ² K; TC: 0.139 W/mK. Corn cob showed a D like cork and higher than EPS. Corn cob had high WA due its microstructure and composition. Corn cob showed TT and TC values higher than other ThI materials as EPS, but its ThI capacity was still adequate for building application purposes.
Pinto et al. (2012b)	Panels	Moulding	MeP, ThP	<i>BioF</i> : corn cob <i>BI</i> : concrete	D: 358.5-948.1 kg/m ³ ; CS: 80.0-511.11 kN/m ² (corn cob concrete), 1066.7-1720.0 kN/m ² (clay concrete); TT: 1.99 W/m ² K. Corn cob concrete sample with the highest amount of corn cob exhibited good D, CS and thermal values. D and ThP values were in accordance with expanded clay concrete, but CS values obtained was quite low. Corn cob concrete samples could be suitable for non-structural application purposes such as pavement regularization layers.

Anexo 1: Tabla de revisión bibliográfica

Vasile et al. (2012)	Panels	N/S	AP, ChP, PhP	<i>BioF</i> : cork, sawdust <i>Other</i> : PU	Morphology: irregular pore shape and sawdust did not have pores; SA: sawdust showed high SA values for frequencies 1500-3200 Hz, cork showed high SA values for frequencies 1200-2500 Hz; NRC: sawdust showed low reflection for frequencies 1500-3200 Hz, cork showed low reflection for frequencies 1200-2500 Hz. Cork and sawdust samples could be used for SA. The higher thickness, the higher SA, and the lower NRC.
Yao et al. (2012a)	Panels	N/S	AP, PhP	<i>BioF</i> : coir fibre <i>BI</i> : PF-resin	D: 300-400 kg/m ³ ; SA: 0.033-0.934; NRC: 0.334-0.708; Morphology: cylinder structure with hollow centre and other internal holes of fibre cells. The coir fibre could be used as natural SA material due its inner holes structure. The board made from coir fibre and PF-resin showed good SA and it could be used as noise absorption material, for instance, in building, automobile and ship materials.
Yao et al. (2012b)	Panels	Hot pressing	AP, MeP, PhP	<i>BioF</i> : coir fibre and wood particle debris <i>BI</i> : PF-resin	D: 400-800 Kg/m ³ ; IB: 0.14-0.60 MPa; MOR: 2.5-22.3 MPa; SA: sample with 100% of coir fibre showed the best SA. Hybrid boards made from coir fibre, wood particle debris and PF-resin with high content of coir fibre showed high MOR and maintained the IB. Coir fibre could be used to SA. Hybrid boards with high content of coir fibre showed the highest SA values.
Aigbomian y Fan (2013)	Panels	Moulding	MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : sawdust <i>Other filler</i> : wastepaper <i>BI</i> : lime	D: 356-713 kg/m ³ ; CS: 0.06-0.80 MPa; TC: 0.046-0.069 W/mK; CS increased with the amount of wastepaper, TC increased with the increase of D but clearly decreased CS. Lightweight blocks made from sawdust, wastepaper and Tradical air lime showed adequate TC values suitable to use the composite as ThI to building indoor for non- or semi- structural panelling application.
Barreca y Fichera (2013a)	Panels	N/S	ThP	External layers: lime Internal bearing structure: giant reed stems (<i>Arundo donax</i>) (BIO)	Average flux: 13.53-13.60 W/m ² ; Average inside temperature: 24.14-25.18 °C; Average outside temperature: 13.92-14.77 °C; Average conductance: 1.31-1.32 W/m ² K; R-value: 0.96 m ² K/W. Board composed by two external layers made from natural lime plaster and an internal bearing structure made from giant reed stems showed appropriate insulating properties. Boards

					prepared in this work showed three times higher R-value and half lower weight per unity than of a hollow tile masonry panel.
Barreca y Fichera (2013b)	Panels	Pressing moulding	HyP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : olive stone <i>BI</i> : cement, lime	R-Value: 13.31-54.6 W/m ² K; D; 1147.94-1654.96 kg/m ³ ; WA: 22.21 %-31.57 %. Composites prepared from olive stone and cement lime mortar could be used as insulating and lightweight floor screeds for under floorings, layers of base coat plaster for insulating walls, or bocks for vertical walls. The higher olive stone content, the lower D, and the higher WA. The addition of 70 wt.% of olive stone reduced ThC of cement lime mortar by over 76%.
Elias-Ozkan y Summers (2013)	Structural elements	Moulding	HyP, ThP	Building 1: load-bearing straw bale (BioF) walls Building 2: straw bale (BioF) infill in a timber-frame structure Building 3: straw bales (BioF) with autoclave aerated concrete blocks	The straw bale construction showed suitable ThP. Hybrid walls constructions made with straw bales in combination with autoclave aerated concrete blocks were more thermally comfortable, cheaper and easier to maintain than conventional structures. But, due their considerable wall thickness, these kinds of structures would be more suitable for constructions in rural areas.
Glé et al. (2013)	Raw materials	Filled	AP, PhP	<i>BIO</i> : hemp	PSD: 21% of particle width and 6% of particle length; Inter-particle porosity: 65%-85%; Tortuosity: 1.5-3.5; AD: 460-605 kg/m ³ . The SA increased due to the particle size distribution of shiv. SRI increased due to the shape and size distribution of particles and the increase of tortuosity.
Huang et al. (2013a)	Raw materials	Moulding and laminated	AP, MeP, PhP, ThP	<i>BIO</i> : coconut fibre <i>Other</i> : nonwoven fabric, polyester (PET) fibre	TS: 1.97-6.67MPa; SA: 0.600-0.711; TC: 0.028-0.050 W/mK. Composite boards made from nonwoven fabric, polyester fibre and coconut fibre showed an increased in SA values when the amount of coconut fibre was equal to around 25 wt.%. Composite boards showed appropriate TC values. But it would be necessary to improve the SA at low frequencies of composites because these frequencies are the most harmful to human health.
Huang et al. (2013b)	Panels	Moulding	ThP	<i>BioF</i> : straw <i>BI</i> : cement	TC: 0.070-0.126 W/mK. Composite slab made from a straw insulation core showed interesting ThP. TC of samples increased with the increase in cement content and with the

					increase of straw fragments length. TC was quite lower after drying than before drying.
Liu y Li (2013)	Panels	Hot pressing	ThP	<i>BioF</i> : wheat straw <i>BI</i> : MDI-resin	R-value: 0.091-0.428 m ² K/W; TC: 0.087-0.092 W/mK; Minimum thickness of board to TC adequate (≤ 1 and ≤ 1.5): 20.28, 39.78, 9.78 mm. Small thickness boards made from straw and MDI-resin glue showed the desired ThI effect. Boards could transform waste into assets by easy processing and was constructed conveniently.
Suhawati et al. (2013)	Panels	Moulding	AP, MeP, PhP	<i>BioF</i> : kenaf <i>BI</i> : latex <i>Other</i> : calcium carbonate of 50% mole epoxidized natural rubber and methyl methacrylate grafted natural rubber lattices	D: 22.6-43.3 kg/m ³ ; Hardness: 29.9-49.8; SA: 0.13-0.78. In the composites made from kenaf, calcium carbonate and methyl methacrylate grafted natural rubber lattices, the kenaf determined the air cavities inside the composite, while calcium carbonate determined the stiffness of the cell wall, and these properties improved the SA of the composites. As kenaf content increased, the D and hardness values were decreased.
Alavez-Ramirez et al. (2014)	Panels	Moulding and filled	MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : coconut fibre <i>BI</i> : concrete	Properties of coconut fibres: D: 1.15 kg/m ³ , TS: 150 MPa, MOE: 3 GPa, TC: 0.046-0.068 W/mK; Thermal damping: 0.39 (ferrocement + coconut), 0.90 (ferrocement only), 0.87 (concrete slab). The precast ferrocement roofing with channel filled with coconut fibre showed a thermal time lag of 210 min and a thermal damping of 43% compared to ferrocement only precast roofing that did not show any thermal damping. Coconut fibres limited the flow of heat at peak times where temperature showed their highest values. The precast ferrocement roofing with coconut fibre could provide an ecological alternative for energy saving and thermal comfort.
Batouli et al. (2014)	Panels	Moulding	Life cycle analysis, MeP, ThP	<i>BioF</i> : kenaf <i>BI</i> : PU	TC: 0.03305-0.05540 W/mK; Shear Strength: 0.084-0.178 MPa; Peak load: 14.255-32.055 N; Highest environmental impacts: habitat alteration, water intake. Kenaf plant had lesser environmental impact than PU but the increase of kenaf content in composites did not result in less environmental impact. The incorporation of 5% of kenaf in PU composites showed good TR but poor SS values.

Anexo 1: Tabla de revisión bibliográfica

Cherki et al. (Cherki et al., 2014)	Panels	N/S	PhP, ThP	<i>BioF</i> : cork <i>BI</i> : gypsum	D: 446.9-803.06 kg/m ³ ; SHC: 1001.4-1287.89 J/kgK; TEF: 239.96-493.04 J/m ² Ks ^{1/2} ; TC: 0.098-0.302 W/mK. TC values measured experimentally for composites made from cork and gypsum were lower than those obtained with the Maxwell and Hamilton models. The incorporation of cork in gypsum reduced the effective TC.
Doost-Hoseini et al. (2014)	Panels	Hot-pressing moulding	AP, HyP, MeP	<i>BioF</i> : bagasse <i>BI</i> : UF-resin and MUF-resin	MOR: 2.99-11.84 MPa; IB: highest 0.407 MPa; WA: no significant difference; ST: highest values by homogeneous board with the highest D; Maximum hardness value in the homogeneous board a D of 500 Kg/m ³ ; Maximum SA values at 2000 Hz in board with a D of 500 Kg/m ³ ; Regression analysis: 0.004 (SA at 250 Hz and MOR)- 0.930 (MOR and Hardness). SA values were influenced by the type of board (homogenous or layered, UF-resin or MUF-resin, D values). The resin type did not affect both PhP and MeP, but it influenced in SA values. MOR and IB may be considered good criteria to evaluate MeP and PhP.
Efe y Alma (2014)	Panels	Hot pressing	ChP, HyP, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : sunflower stalks <i>BI</i> : UF-resin, MUF-resin and PVA	D: 180-290 Kg/m ³ ; MOR: 9.4-13.1 MPa; TGA: wooden outer part started to decompose at 278.8 °C, total weight loss was 92.17%; TC: 0.045-0.065 W/mK; MOR: 14.65-25.3 MPa; MOE: 1.8-2.963 GPa; WA: 74.6%-82%; ST: 21.1%-25%; Flaming combustion: 163-611 s. The board made from sunflower stalks, UF-resin, MUF-resin and PVA showed similar TC values than insulation materials such as glass wool, rock wool, etc. Its flaming properties could make it useful to retarding possible fires in buildings.
Jayamani et al. (2014)	Panels	Hot-pressing moulding	AP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : alkali treated and untreated luffa fibres <i>BI</i> : epoxy resin	Composite with 10 wt.% of luffa fibre and with hardener to epoxy resin ratio of 1:10 showed the highest SA, but composites with 20 wt.% of luffa fibre showed higher SA. The higher frequency, the higher SA. Thermal decomposition: 30-900 °C; Morphology: dense hollow structure. Composites made from luffa fibre, epoxy resin and hardener with untreated luffa fibre showed the highest SA. TS _{tb} was higher in the composites with

					alkali treated fibres than in composites with untreated luffa fibres.
Kraus y Kubečková (2014)	Structural elements	N/S	ThP	<i>BIO</i> : lumber from forest, straw bales, bamboo, cork, wood fibre <i>Other</i> : recycled stone, recycled metal, clay, calcium sandstone, fibre glass, sheep wool	Percentage of ThI: 0.67%-28.67%; Thickness of ThI: 160-500 mm; TT: 0.08-0.16 W/m ² K. Modern building materials use in the external cladding of buildings must have a high resistance to heat transmission in minimal thickness. These materials could reduce the energy and environmental impacts of buildings.
Khidir et al. (2014)	Particulate samples	Moulding	AP	<i>BIO</i> : date palm fibres	Good improvement in SA. The introduction of air gap shifts the resonance absorption towards the low frequency range. Below 2000 Hz there was improvement in SA for all air gap thicknesses. Natural date palm fibres showed good SA for all frequency range. But the composites made from natural date palm fibres and an aluminium perforated plate panel showed an adequate SA performance only above 2500 Hz.
Latif et al. (2014)	Structural elements	N/S	HyP, ThP	<i>BioF</i> : hemp <i>BI</i> : gypsum <i>Other</i> : stone wool	RH: 35%-90%; In situ calculated TT: 0.34, 0.42 W/m ² K; Equivalent TT: 0.27-0.44 W/m ² K (stone wool panel), 0.17-0.46 W/m ² K (hemp panel); Average temperature in the interfaces: 20.7 °C (stone wool), 20.6 °C (hemp). Stone wool-based panels were more prone to frequent condensation in the oriented strand board interface than hemp-based panels. Stone wool- and hemp-based panels showed identical TC values, but the hemp panel showed lower TT than stone wool panel.
Mati-Baouche et al. (2014)	Panels	Pressing moulding	AP, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : sunflower's stalks <i>BI</i> : chitosan	D: 150-200 kg/m ³ ; TS: maximum TS: 2-2.6 MPa, MOE: 25-250 MPa; TC: 0.056-0.058 W/mK; SA: <0.5. ThP and MeP of composites made from chitosan and sunflower's stalks particles were improved by the increase of the compaction pressure. Composites did not show penetration of the chitosan BI inside the sunflower cells, which means a good preservation of the natural properties of sunflower stalk. Composite showed low performance in AP.
Navacerrada et al. (2014)	Panels	Moulding	AP, ThP	<i>BioF</i> : fique fibres (from the plant leaves) <i>BI</i> : polymer	SA showed high values at high thickness; Static FR: 1.57-2.60 (x10 ⁴) N/m ⁴ ; TC: 0.037-0.078 W/mK; SA derived from the fitting to the semi-empirical model at normal incidence: 0.039-1.256.

					Fique samples showed typical SA values of any fibrous material. SA values depended on the material's D and thickness. The higher D, the higher SA. Fique-based samples presented similar properties than mineral wools and showed more advantages as processing, availability, low weight, low cost, high mechanical strength and biodegradability.
Prabhakaran et al. (2014)	Panels	Moulding	AP, MeP	<i>BioF</i> : flax fibre <i>Other filler</i> : glass <i>BI</i> : epoxy resin	SA: maximum at 1000 Hz for all composites, flax fibre and epoxy resin composite and flax fibre, glass and epoxy composite showed, respectively, a 21.42% and 14.28% SA higher than glass epoxy composite; MOR: 2.146 (flax) -3.357 (glass) MPa; MOE: 92.45 (flax) -144.89 (glass) MPa. Composites made from flax fibres as reinforced showed higher SA and vibration damping than composites made from glass as reinforced. But composites showed lower MOR and MOE than glass composites reinforced.
Sassoni et al. (2014)	Particulate samples	Hot-pressing moulding	HyP, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : hemp hurds <i>BI</i> : hybrid organic-inorganic (magnesium oxide, flour of vegetable protein and magnesium sulphate solution)	BD: 330-1280 kg/m ³ ; WA: 10.1%-118.4%; ST: 3.6%-10.6%; TC: 0.078-0.138 W/mK; CS: 1.15-3.04 MPa; MOR: 0.90-17.47 MPa; TS: 0.18-1.88 MPa. Low-D composites made from hemp hurds and a novel hybrid organic-inorganic BI showed the lowest TC values, a quite good reaction to fire (class C) and relatively good MeP. Medium-D composites showed a high TC value but a very good reaction to fire (class B) and good MeP. High-D composites showed the best MeP.
Srivaro et al. (2014)	Panels	Hot pressing moulding	HyP, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : oil palm wood (core) <i>BI</i> : MUF-resin bond face and core) <i>Other</i> : rubberwood veneer face	D: 393-424 kg/m ³ ; ST: 1.9%-4.6%; WA: 71%-82%; TC: 0.08-0.11 W/mK; MOR: 48-52 MPa; MOE: 6538-8458 MPa. Lightweight sandwich panels made from oil palm wood, rubberwood veneer face and MUF-resin showed superior dimensional stability and good MeP and ThP. TC, ST and MOE values were influenced by oil palm wood core grain direction. Prepared panels could be used for structural insulated uses.
Teslík et al. (2014a)	Raw materials	Filled	AP, MeP, PhP	<i>BIO</i> : straw	BD: 90-120 kg/m ³ ; Settlement: 12.5-177.5 mm. The high D of the straw showed a negative impact on ThP and AP. The crushed straw could be used in construction.

Teslík et al. (2014b)	Structural elements	N/S	AP	<i>BioF</i> : straw Structure: wood	Equivalent continuous sound pressure level of 2 m in front of facade: 72.8 dB; SIN of building envelope: 40 dB. SIN of the house with wall filled with straw was lower than the established in the requirements of Czech legislation (43dB). Therefore, it was necessary to optimize the properties.
Wu et al. (2014)	Biofoams	Pressing moulding	ChP, HyP, MeP, ThP	<i>BioF</i> : wheat gluten powder <i>BI</i> : silica-based aqueous ethanol solution of tetraethyl orthosilicate	D: 127-165.9 kg/m ³ ; Flammability properties: the composite required more than 3 s inside the flame before to appear an apparent flame from the silica; MOE of composite with 100% of wheat gluten: 6.9 MPa, decreased with increasing of silica content; SHC: 1.20-1.48 J/g°C; TD: 0.22-0.29 mm ² /s; TC: 0.039-0.057 W/mK; MC: 2%-6%. With the increase of silica content in the biohybrid foam made from wheat gluten and silica showed more brittle foam formed. The biohybrid foam made from wheat gluten and silica showed excellent fire-retardant properties.
Yeon y Kim (2014)	Panels	N/S	AP	<i>BioF</i> : wood wool, Other: cellulose; tectum board; a mixture of PP and polyester fibre, and wood wool board; foamed aluminium; Glass wool; rock wool	SA: 0.3-0.9; Reverberant absorption coefficient: 0.21-0.71; NRC: 0.40-0.95. Sound absorbers made from glass wool and rock wool showed the highest SA, while the absorber made from wood wool board showed the lowest SA.
Adamopoulos et al. (2015)	Structural elements	Moulding	AP, MeP, ThP	<i>BioF</i> : wood chips <i>Other filler</i> : rubber particles <i>BI</i> : gypsum	D: 417-975 kg/m ³ ; CS: 0.06-1.22 MPa; TC: 0.209-0.322 W/mK; SA: 0.18-0.47. The bricks and cylindrical samples made from gypsum, wood chips and rubber particles with coarse fractions, and that did not exceed the 25% of fibre content showed the better MeP.
Ashour et al. (2015)	Structural elements	Pressing moulding	PhP, ThP	<i>BioF</i> : wheat and barley straw <i>BI</i> : soil, cement, gypsum	Microstructure: fibres uniformly distributed inside the brick; Straws were arranged in different directions; D: 1088.5-1575.6 kg/m ³ ; TC: 0.300-0.961 W/mK. D and TC values obtained for bricks made from soil, cement and gypsum decreased significantly with the incorporation of wheat and barley straw. But it was observed that as the gypsum content increased, TC values were increased.

Anexo 1: Tabla de revisión bibliográfica

Berardi y Iannace (2015)	Particulate samples	Pressing	AP, PhP	<i>BIO</i> : kenaf, wood, hemp, coconut, cork, giant reed, cardboard and sheep wool	D: 40-470 kg/m ³ ; Thickness: 30-115 mm; FR: 250-3500 Rayl/m; SA: 0.01-0.95; NRC: 0.2-0.75; SA prediction: 0.05-0.96; NRC prediction: 0.20-0.65. Most of the natural fibres showed excellent SA values at medium and high frequencies. As the thickness increased, SA increased at low frequencies.
Bories et al. (2015)	Structural elements	Extrusion moulding	ChP, HyP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : wheat straw, sunflower seed cake and olive stone flour <i>BI</i> : clay	TGA of raw material: degradation first at 240 °C and maximum 570 °C with 87% of weight loss; Linear shrinkage: 3.3%-5.5%; Loss of ignition: 10.5%-14.5%; Porosity: 31.6%-43.5%; BD: 1460-1770 Kg/m ³ ; WA: 17.8%-30%; MOR: 5.3-10.9 MPa; TC: 0.2-0.38 W/mK. The incorporation of wheat straw, sunflower seed cake and olive stone flour in fired bricks increased the porosity and WA, and decreased the TC, D and MOR.
Carvalho et al. (2015)	Raw materials	N/S	AP, HyP, PhP	<i>BIO</i> : sugarcane bagasse, Pinus and eucalyptus	BD: 543 (bagasse) – 645 Kg/m ³ ; MC: 8.08% (bagasse) – 9.69%; SA: low at 0-150 Hz, an increase from 50 to 60 dB at 600-2000 Hz and a decrease above 2000 Hz, at 315 Hz the panels showed resonance that was the maximum SA. Particleboard made from sugarcane bagasse showed the best SIN at 630-1000 Hz. At 2000 Hz, SA of all the particleboards decreased.
Cigasova et al. (2015)	Particulate samples	Moulding	HyP, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : hemp hurds (treated and untreated) <i>BI</i> : cement	CS: 1.08-4.9 Mpa; D: 910-1200 kg/m ³ ; TC: 0.058-0.098 W/mK; Highest values of water content: 13.9%-26%. Lightweight composites made from hemp hurds and magnesium oxide cement showed acceptably TC values, hence, they could be used to insulation in construction. Physical and chemical treatments of hemp hurds decreased CS values and composites with chemical treatments showed the lowest values of TC.
Cismaru et al. (2015)	Panels	N/S	ThP	<i>BioF</i> : hemp hurds <i>Other filler</i> : sand <i>BI</i> : cement, lime	TC: 0.089343-0.250152 W/mK. Composites made from hemp hurds and mineral BI showed inferior values in TC than gypsum as received. They showed low TC values with the increment of both temperature and hemp hurds content.
Da Rosa et al. (2015)	Panels	N/S	ThP	<i>BioF</i> : Rice husks, sunflower stalks and jute fabric <i>BI</i> : gypsum	Heat resistance at 150 °C (reduction in weight): 5.51%-12.35%; Thickness: 43.0-54.2 mm; TC: 0.049-0.994 W/mK. Boards made from rice husks, sunflower stalks, gypsum and jute fabric were put in a solar collector and they worked similarly to glass wool.



					Thus, they could be used in ThI as an alternative to conventional materials.
Jayamani et al. (2015)	Panels	Hot-pressing moulding	AP, ChP, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : rice straw stem fibres (untreated and treated with sodium hydroxide) <i>BI</i> : MAH-PP	The composite made with fibre (25 wt.%) showed higher value of SA; Maximum SA:0.126-0.147; TGA: maximum decomposition temperature 470-486 °C. Composites made from untreated rice straw stem fibres and fibres treated with sodium hydroxide as aggregates, and MAH-PP as matrix with the highest content of fibre and thickness showed the highest SA. Treated fibres improved the interfacial adhesion, TS values and TStb. TStb decreased with the increase of fibre content.
Kang et al. (2015)	Panels	N/S	Emissivity, HyP, ThP	<i>BIO</i> : wood (Paulownia coreana) <i>BI</i> : Silicon	MC: 21.5% (Paulownia coreana), 6.6% (high D fibreboard); TC: 0.08 W/mK (Paulownia coreana), 0.10 W/mK (high D fibreboard); Heat transfer: 0.13-18.1 W (Paulownia coreana), 0.10-12.5 W (high D fibreboard); Total energy transfer: 4.48 kJ (Paulownia coreana), 3.25 kJ (high D fibreboard). Box made from Paulownia coreana showed lower heat loss and greater amount of heat transferred than the box made from high D fibreboard.
Kim et al. (2015)	Raw materials	N/S	AP, MeP	<i>BIO</i> :: coconut fibres <i>Other</i> : mulberry papers only and with coconut fibres	D: 138-204 Kg/m ³ ; SA: decreased and the frequency of maximum SA increased as D increased. Structures made from mulberry papers only and with coconut fibres showed better SA than conventional porous acoustic foams with the same thickness. Structures showed excellent SA and frame AP and they could be used in applications where the noise and vibrations controls were required in a specific direction.
Mati-Baouche et al. (2015)	Panels	Pressing moulding	MeP, ThP	<i>BioF</i> : sunflower stalk particles (pith and bark) <i>BI</i> : polysaccharide with chitosan from shrimp shell deacetylated and acetic acid	Maximum TS: 0.11-0.22 Mpa; E: 23.18-54.18 Mpa; TC: 0.069 W/mK. Composite made from chitosan BI and sunflower stalk particles showed larger MeP than building specifications in Europe.
Mintorogo et al. (2015)	Panels	N/S	ThP	<i>BioF</i> : coconut fibres <i>BI</i> : concrete	Thermal surface gap between a reference sample made only from concrete and sample made from concrete and coconut fibres was 3-13 °C. Maximum indoor air temperature on sample made from concrete and coconut fibres was around 3.1 °C and

					lower than that obtained for sample made with concrete only. Flat concrete rooftop prepared from coconut fibres exhibited lower surface heat fluxes during the daytime and the stored heat was faster to release. But overnight flat concrete rooftop showed higher indoor air temperature than sample made from concrete only. Both coconut straw and reeds fibres could be used in building, and they can be recycled.
Muñoz y Trotta (2015)	Structural elements	Computer numerical control	AP, MeP	<i>BioF</i> : pine sawdust <i>BI</i> : plastic waste (LDPE)	Composite properties: MOE: 15.046 kg/cm ² ; MOR: 227 kg/cm ² ; D: 0.033 lb/in ³ ; TS: 6118 kg/cm ² . Bricks properties: Noise level: 29.9-31.2 dB; Noise absorption level: 37.6%-40.2%; TS: 123.121-162.036 Pa. The main advantages of bricks prepared with sawdust and plastic wastes were an evident reduction of residues, general economic and environmental benefits and the improvement in construction.
Sable et al. (2015)	Panels	N/S	PhP, ThP	<i>BioF</i> : birch fibres <i>BI</i> : potato starch <i>Other</i> : sodium tetraborate decahydrate and boric acid	TC: 0.040-0.043 W/mK; D: 102-120 kg/m ³ ; Mass reduction decreased when the amount of starch was increased from 0.1 wt.% to 0.5 wt.%. Boards made from birch fibres, potato starch, sodium tetraborate decahydrate and boric acid could be used as adequate ThI boards. Different proportions of potato starch showed insignificant differences in TC values.
Sakhare et al. (2015)	Panels	N/S	PhP, ThP	<i>BioF</i> : sawdust <i>Other</i> : aluminium sheet, broken glazed tiles, EPS, sawdust, mineral fibreboard and false ceiling panels	TC: 0.038-1.580 W/mK; D of materials used: 16-2300 kg/m ³ ; SHC: 800-1340 J/kgK; R-value: 0.28-0.55 m ² K/W. Two combinations of insulating materials made from reflecting-insulating materials in concrete slab showed significant higher ThI than conventional concrete slab.
Saw et al. (2015)	Panels	Hot-pressing moulding	AP, HyP, MeP, PhP	<i>BioF</i> : native luffa mat and coir fibre <i>BI</i> : epoxy resin	WA: 0.22%-21.87%; ST: 0%-10.57%; TS of fibres: 144.6 Mpa; MOE of fibres: 19500, 3101.2 Mpa; EL at break of fibres: 1.2%, 32.3%; Inner porosity: 16%-25%, 7%-13%. The higher coir fibre content, the higher SA. Pure coir fibre showed the highest WA and ST values. The hybrid composite made from luffa showed the maximum mechanical and water resistance while composite made from pure coir showed the minimum values. The hybrid composite luffa/coir/luffa showed better mechanical and water

					resistance than hybrid composite coir/luffa/coir. The poor MeP of coir fibre were compensated by those of the luffa while the AP of luffa were compensated with coir.
Sinka et al. (2015)	Panels	Moulding	HyP, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : hemp shives <i>BI</i> : lime	D: 290-355 kg/m ³ ; WA: 10.615-20.079 kg/m ² ; CS: 0.030-0.200 kPa; TC: 0.069-0.097 W/mK. Composite material made from hemp shives and different BI based in lime showed a weakness of the inner core due the insufficient carbonization and low water content. TC values were related to D and a pre-compression of the material could lead to lesser amount of BI and contribute to reduce the environmental impact. WA depended on the type of BI, the more hydraulic BI showed less WA.
Smardzewski et al. (2015)	Raw materials	N/S	AP, HyP, MeP, PhP	<i>BIO</i> : wood (bamboo, honeycomb paper, pine, oak, birch) <i>Other</i> : rattan mat, Lloyd loom mat, synthetic leather	D: 220-848 kg/m ³ ; Porosity: 43%-85%; FR: 18-142 kNs/m ³ ; MOR: 0.6-55.5 Mpa; MOE: 0.114-9.170 Gpa; Specific impedance: 196-1666 kNs/m ² ; MC: 4.8%-8.2%; SA: 0.04-0.64. Panels prepared with different types of wood of low porosity and high specific impedance limit could be applied as structural SA elements.
Volf et al. (2015)	Raw materials	N/S	Biological health risk, HyP, PhP, ThP	<i>BIO</i> : straw bale, flax fibre, wood fibre and hemp fibre <i>Other</i> : treated and untreated sheep wool, ordinary mineral wool	Dry D: 11.3-98 kg/m ³ ; TC: 0.039-0.065 W/mK; TD: 0.39-1.23 m ² /s; VHC: 0.05-0.16 J/m ³ K; SHC: 1.58-6.04 J/kgK; MC: straw bale, untreated sheep wool and wood fibre showed the highest values. Straw bale, flax fibre, treated and untreated sheep wool, wood fibre, hemp fibre and ordinary mineral wool as insulations materials could be used in construction in combination with other constructions materials. These materials showed similar and even better ThP than construction insulation materials.
Wegerer et al. (2015)	Panels	N/S	HyP, ThP	<i>BioF</i> : wood fibres <i>BI</i> : gypsum, clay	R-value: 1.5-2.2 m ² K/W; HC inside: 19.5-29.3 kJ/m ² K; Fire behaviour: usually flammable; MC: 2%-16%. The different panels configurations made from wood fibres, gypsum and clay exhibited good resistance to fungus and humidity in constructions.
Wei et al. (2015)	Panels	Hot-pressing moulding	HyP, MeP, ThP	<i>BioF</i> : rice straw <i>BI</i> : MDI-resin	TC: 0.0514-0.0519 W/mK; IB: 0.0112-0.0334 Mpa; MOR: 0.39-2.6 Mpa; ST: 11.41%-20.4%. Insulation boards made from rice straw and MDI-resin could be used in construction to construct walls

					or ceiling insulations. The lower particle size, the higher D, TC and MeP, and the lower D.
Amel et al. (2016)	Raw materials	N/S	AP	BIO: cork and Aleppo pine wood	SA peaks: 0.09-0.7; SRI: 65-80 dB. SA was affected by the thickness of samples made from Aleppo pine wood, agglomerate cord and sandwich assemblies with two wooden layer and inter layer of cork. High thickness values in samples led large SA values at 100-1600 Hz. Sandwich composite made from wood and rock showed the highest values of SRI.
Asdrubali et al. (2016)	Particulate samples	Overlapping layers	AP, ThP	BIO: reed (Phragmites Australis)	TC: 0.053-0.066 W/mK; MC: 1.8%-12.6%; HF: 16.09 W/m ² ; R-Value: 1.17 W/m ² K; SA: 0.08-0.61. The layout and characteristics of the reeds did not influence TC values, but AP varied quite a lot in function of longitudinal, perpendicular or crossed layout. Panel made from longitudinal and perpendicular layers of reed exhibited the highest SA values. Higher material compaction improved SA values in samples. Reed bases could be a good material to ThI and SIN in construction.
Bansod et al. (2016)	Particulate samples	Stitched	AP, PhP	BIO: jute	Porosity: 0.69% (fibre), 0.91% (felt); Tortuosity: 1.02% (fibre), 1.05% (felt); FR: 20.087 Ns/m ⁴ (fibre), 33.190 (felt); SA (Rigid Backing Condition): 0.9 at 1000-4000 Hz; SA (with Air Gaps): higher values than without air gaps, when increase the thickness, increase the SA; NRC: 0.35-0.8. Jute material displayed good SA levels and could be used as SIN in construction, industrial noise, automotive applications, etc.
Barreca y Fichera (2016)	Raw materials	N/S	PhP, ThP	BIO: cork	Thickness: 11.02-29.04 (x10 ⁻³) m; Board D: 108.70-389.71kg/m; Mean cork diameter: 0.80-6.67 (x10 ⁻³) m; TC: 0.47-0.83 (x10 ⁻¹) W/mK; SHC: 1974.70-5467.50 JK/kg; TD: 7.26-10.60 (x10 ⁻⁸) m ² /s. Particleboards made from agglomerate cork showed better ThP than those obtained for natural cork. These particleboards could be an alternative to the more expensive boards of virgin cork.
Binici et al. (2016)	Panels	Pressing moulding	AP, HyP, MeP, ThP	BioF: corn stalks BI: epoxy resin, gypsum, cement	WA: 18.75%-28.12%; CS: 0.11-0.29 Mpa; MOR: 0.04-0.13 Mpa; TC: 0.075-0.1588 W/mK; Ultrasonic sound penetration velocities: 0.12-0.74 km/s. Composites obtained from corn stalk

					and epoxy resin, gypsum and cement showed quite low TC values, so the composites in general showed good ThP.
Bories et al. (2016)	Panels	Extrusion	HyP, Impact assessment, Life cycle, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : wheat straw and olive stone flour <i>Other filler</i> : sand <i>BI</i> : clay <i>Chemical materials</i> : glycerol carbonate and dimethyl carbonate	Loss of ignition: 9.1%-11.2%; Porosity: 29.2%-33.0%; D: 1790-1900 Kg/m ³ ; MOR: 6.5-10.4Mpa; TC: 0.46-0.57 W/mK. Fire clays tablets made from agricultural waste (wheat straw and olive stone flour) and/or other chemical reagents enhanced their porosity with the increase of the amount of raw materials incorporated into the sample. The higher porosity, the lower TC and MeP. In construction, these properties should be complemented and the incorporation of 1 wt.% of wheat straw in the fire clays tablets showed the best complementation.
Chabriac et al. (2016)	Raw materials	N/S	AP, PhP	<i>BIO</i> : hemp shiv, sunflower bark, sunflower pith, flax shiv and rapeseed straw	Highest SA: 0.86-0.99; Sample D: 34-168 kg/m ³ ; Total porosity: 82.5%-99%; Inter porosity: 62.5%-82.6%; Intra porosity: 45.3%-95.8%; Particle D: 144-663 kg/m ³ ; Skeletal D: 960-3400 kg/m ³ ; Tortuosity: 2.2-2.6. The hemp shiv, sunflower bark, sunflower pith, flax shiv and rape straw showed the best SA values. SA values obtained were similar to those reported for other commercial materials such as fibreglass.
El Fgaier et al. (2016)	Structural elements	Extrusion	MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : flax shives and maize starch <i>Other filler</i> : sand <i>BI</i> : clay <i>Other</i> : PS beads	Apparent D of additives: 54-500 Kg/m ³ ; Specific D of additives: 232-1493 Kg/m ³ ; D: 1470-2050 Kg/m ³ ; Apparent porosity: 11%-24%; CS: 6.21-23.9 Mpa; TC: 0.43-0.65 W/mK; Pores: closed in majority. Masonry bricks made with flax shives, maize starch and PS beads as additives led to better thermal performance. The masonry bricks with 2.5 wt.% of flax shives or 7.5 wt.% of starch showed the best results.
Gliścińska et al. (2016)	Panels	Hot-pressing moulding	AP, MeP, PhP	<i>BioF</i> : flax, cotton fibres, straw (sunflower, corn and wheat) <i>Other filler</i> : cellulose <i>BI</i> : PLA	Thickness: 3.52-5.5 mm; Apparent D: 236.01-1321 kg/m ³ ; TS at maximum load: 0.79-2.69 Mpa; SA: 0.059-0.757. Composites made from PLA and BIO fibres showed optimum SA values. Composites prepared with straw increased the SA levels but declined TS. SA values could rise as the fibres surface enlarge. Composites prepared could be used as good sound absorbers in construction and automotive industry.

Anexo 1: Tabla de revisión bibliográfica

Hazrati- Behnagh et al. (2016)	Panels	Hot-pressing moulding	AP, MeP, ThP	<i>BioF</i> : sugarcane bagasse residues and wood planer shaving (beech, poplar, walnut) <i>BI</i> : UF-resin and MUF-resin	TC: 0.048-0.051 W/mK; SA: 14%-21%; NRC: 0.313 (wood), 0.365 (bagasse); CS parallel: 0.43-1.55 Mpa; CS perpendicular: 0.22-2.23 Mpa. Particleboards made from bagasse showed better MeP and insulation properties than particleboards prepared from wood. These particleboards could be used as insulation material to wall, ceiling tiles, false ceiling or panelling for energy conservation and SIN in construction.
Kain et al. (2016)	Panels	Hot pressing	ChP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : larch bark <i>BI</i> : tanning resin, UF-resin	D: 279.12-576.56 kg/m ³ ; TC measured: 0.0684-0.0959 W/mK; TC calculated based on composition: 0.066-0.094 W/mK; TC calculated by fused deposition modelling: 0.055-0.0937 W/mK; D inner bark: 302.96-486.13 kg/m ³ ; D outer bark: 494.88-763.74 kg/m ³ . Boards exhibited a vast range of small pores and showed quite low TC values that can be optimized by finding the ideal interior structure for bark boards.
Kerdtongmee et al. (2016)	Particulate samples	Pressing	AP, PhP	<i>BIO</i> : oil palm trunk fibre	SA: 0.1-0.8; Porosity: 0.62%-0.76%; FR: 1.99-3.28 (x10 ⁵) Pa s m ⁻² . Panels prepared from cross-cut oil palm trunk fibres showed higher SA than panels made from parallel-cut fibres. Panels with blind holes, through holes and grooves showed higher SA than panels non perforated.
Kinnane et al. (2016)	Panels	Moulding	AP, PhP	<i>BioF</i> : hemp <i>BI</i> : lime, cement	D: 469-583 kg/m ³ ; Porosity: 85%-91%; Morphology: pore structure; SA: 0.24-0.53; NRC: 0.2-0.4; Reverberation times: 0.4-1.4 s. Concrete made from hemp and lime showed significant SA. But, when the hemp-lime wall was rendered the SA decreased.
Mati-Baouche et al. (2016)	Panels	Pressing moulding	AP, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : sunflower stem (bark and pith) <i>BI</i> : chitosan with acetic acid	E: 0.14 Mpa; TC: 0.077 W/mK; BD: 186.49 kg/m ³ ; Total open porosity: 86.6%; Tortuosity: 2.37; FR: 41800 Ns/m ⁴ ; Kinematic porosity: 72%; Dead-end porosity: 14.6%; SA: reached a peak of 0.7. Bio-based material made from sunflower stem and chitosan showed a high porosity that could improve ThI and SIN. TS and maximum stress at break remained relatively high.
Negro et al. (2016)	Raw materials	N/S	AP, Questionnaire about	<i>BIO</i> : wood	SA peaks: 0.39-1 at 106-1176 Hz; Questionnaire: noticed any improvement of AP rate from 1 to 5 where 4 was the 64%. Poplar

			the perception of the acoustic effect of panels		plywood prototypes showed an effective SA at low frequencies. The users showed high appreciation of the SA effect of panels.
Niro et al. (2016)	Panels	Hot-pressing moulding	HyP, Material emissions, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : coconut husk <i>BI</i> : tanning extracted from the bark of mimosa with hexamine aqueous and hydroxide solution	Morphology: thin-walled cells; Board with the low D showed lower MeP: MOE: 0.9 Gpa, MOR: 10 Mpa, IB: 0.3 Mpa; Heat power D: 18.2-20.8 W/m ² ; R-value: 0.482-0.550 m ² K/W; TC: 0.071-0.082 W/m ² K. Particleboards made from coconut husk and tanning-based adhesives showed R-values that satisfying the Japanese Standards (0.138-0.361 m ² K/W). The manufacture of affordable materials using only local sources was considered feasible in Philippines.
Othmani et al. (2016)	Panels	Pressing moulding	AP	<i>BioF</i> : sugarcane wastes <i>BI</i> : UF-resin and ammonium chloride (NH ₄ Cl)	FR: 29.143-61.857 N s/m ⁴ ; SA: 0.7-1. Composite material made from sugarcane wastes, UF-resin and NH ₄ Cl showed high SA values. The lower particle size, the higher FR and SA. The lower resin content, the higher FR, and the lower SA.
Pisello et al. (2016)	Panels	Moulding	AP, ThP	<i>BioF</i> : driftwood residues <i>Bi</i> : cement	Volumetric SHC: 0.314-1.653MJ/m ³ K; TC: 0.108-0.239; TD: 0.148-0.397 mm ² /s; SA: 0.2-0.8; SRI: 5-55 dB. The mineralization procedure caused a decrease in TC and SA, and an increase in volumetric SHC. Panels made from driftwood residues and cement showed adequate values of TC and SA. Panels prepared in this work could be used as potential insulators in construction.
Samsudin et al. (2016)	Panels	Hot-pressing moulding	AP	<i>BioF</i> : oil palm empty fruit bunches in coir and dust forms <i>BI</i> : UF-resin	SA: maximum 0.99 at 3250 Hz (dust) and 0.62 at 3500-5000 Hz (coir). The panels made from empty fruit bunches and UF-resin showed good SA. Particle size and shape influenced significantly in AP. In general, the smallest particles showed better SA than the highest particles.
Sari et al. (2016)	Particulate samples	Pressing moulding	AP, MeP, PhP	<i>BIO</i> : corn husk fibres untreated and alkali treated	Morphology: different porous structures with open porosity; TS: 160.49-368.25 MPa; MOE: higher in raw fibres than those treated with 2% and 5% of NaOH; D: 344-615 kg/m ³ ; Porosity:

					0.77-0.88; FR: 11.118-5572 Pa s m ² ; Tortuosity: 1.06-1.15; SA: maximum 0.93-0.99. The composite material prepared from corn husk fibres could be used to SA. The alkali treatment with NaOH improved the MeP and AP of composite materials.
Sierra-Pérez et al. (2016)	Panels	N/S	Environment impact, Product life cycle, ThP	<i>BioF</i> : forestry cork wastes <i>Other</i> : PU	Panel properties (previous): TC: 0.042 W/mK; D: 171 kg/m ³ . The most critical stage was the manufacturing of granules and boards. The most influential factors in the life cycle were the transport and the large quantities of electricity and diesel in the manufacturing. Cork boards showed higher positive impacts than other insulation materials.
Tao et al. (2016)	Panels	Moulding	AP, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : rice straw and wheat straw <i>BI</i> : PU foam	CS diminished from 19% to 28% with the addition of fibre. Composites made from PU foams filled with hither fibre content of rice straw and wheat straw showed more open cells, higher values of SA and lower values of TC ad CS.
Tholkappiyan et al. (2016)	Panels	Pressing moulding	AP, MeP, PhP	<i>BioF</i> : banana fibre <i>BI</i> : recycled paper	BD: 130-200 kg/m ³ ; AD: 747-812 kg/m ³ ; Porosity: 0.75%-0.84%; NRC: 0.38-0.55 (experimental), 0.42-0.55 (predicted). Biocomposites made from banana fibre and recycled paper showed the lowest NRC values with 15 mm of fibre cut length and 20 mm of sample thickness, and the highest NRC values with 35 mm of fibre cut length and 60 mm of sample thickness. Biocomposite prepared with fibres of 25 -35 mm length, a volume fibre fraction of 0.2 and a sample thickness of 60 mm showed the best AP.
Vidil et al. (2016)	Panels	Hot-pressing moulding	HyP, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : coconut husk particles <i>BI</i> : castor oil-based PU resin	Apparent D: 330-410 kg/m ³ ; WA: 17.3%-19.8% (2 h), 39.2%-51% (24 h); ST: 4.7%-7.8% (2 h), 11.4%-19.6% (24 h); MOR: 0.515-3.824 MPa; MOE: 88-550 MPa; IB: 0.04-0.05 MPa; TC: 0.135-0.152 W/mK. Particleboards made from castor oil-based PU resin and coconut husk particles could be an acceptable insulation material due its adequate PhP, MeP and ThP.
Zach et al. (2016a)	Particulate samples	Aerodynamic shaping	AP, HyP, MeP, PhP, ThP	<i>BIO</i> : flax <i>Other</i> : polyester fibres, cotton waste	Thickness: 0.0389-0.0881 m; D: 23.1-96.5 kg/m ³ ; TC: 0.0360-0.0495W/mK; Stress at 10% strain: 0.24-1.45 kPa; TS: 2.5-4.1 kPa; SA: 0.35-0.60; Dynamic stiffness: 6.15-8.97 MPa/m. ThP and AP values of the biocomposites prepared from flax, cotton and

					polyester fibres were similar to conventional materials and prepared samples could be quite suitable for its application in civil engineering. prepared samples could be suitable for its application in civil engineering.
Zach et al. (2016b)	Panels	Biocomponent bonding method	HyP, ThP	<i>BioF</i> : hemp shivs <i>Other</i> : polyester fibres	D: 33.7-58.8 kg/m ³ ; MC: 1.205%; The higher BD, the lower TC. Composite material made from hemp shives and polyester fibres showed different values of TC depending on D. The higher D, the lower TC.
Baharudin et al. (2017)	Panels	Injection moulding	AP	<i>BioF</i> : oil palm fronds and empty fruit bunches <i>BI</i> : PLA	Signal reflection: -7.99, -1.04 dB (0.25 λ thickness), -29.5, -0.58 dB (0.5 λ thickness), -16.4, -0.75 dB (0.55 λ thickness) at 5.8 GHz; Optimum signal reflection: -31.98 - -0.56 dB, -34.19 - -0.45 dB; Absorption sound rate: 12.12%, 9.69%; Upper and lower cut-off frequencies: 7.58, 4.11 GHz; Absorption rate Figure of Merit: 24.67%, 19.68%; Bandwidth: 59.73%, 58.04%. Composites made from oil palm frond, empty fruit bunches and PLA showed good signal reflection and transmission of sound, SA rate per wavelength and they could absorb sound signals for a higher range of frequency.
Barreca y Tirella (2017)	Structural elements	Mounting	Analysis of the energy, ThP	<i>BIO</i> : wood and agglomerated cork	Periodic TT: 0.18 W/m ² K; Thermal time shift: 6.71 h; Thermal admittance (external and internal side): 1.05-1.13 W/m ² K; Internal and external area heat capacity: 18.30 kJ/m ² K; TC: 0.06954 W/mK; SHC: 795.65 J/kgK; D: 121.05 kg/m ³ . Shelter made from wood and multilayer agglomerated cork panels performed better than shelter made from brick/brock or metal cladding in all seasons, especially in the hottest seasons. Good indoor conditions in the warmer season were ensured during the temperature change.
Belakroum et al. (2017)	Panels	N/S	AP, HyP	<i>BioF</i> : date palm fibres (surrounds the trunk and dried petioles) <i>BI</i> : lime, corn starch	BD: 386.68-889.33 kg/m ³ ; SA: 0.028-0.854 to 125-2000 Hz; NRC: 0.10-0.45; Maximum SA: 0.83 to 2381-2809 Hz, 0.59 to 3225-3712 Hz, 0.98 to 2500 Hz, 0.7-0.86 to 1600 Hz, 0.657 to 1000 Hz. Composites made from date palm fibres and corn starch as BI showed higher SA capacity at medium and high frequencies than those composites prepared with lime as BI, and their MBV

Anexo 1: Tabla de revisión bibliográfica

					values was quite high. The lower starch content, the lower SA and MBV.
Berardi y Iannace (2017)	Raw materials	N/S	AP	<i>BIO</i> : kenaf, wood, hemp, coconut, straw, cane, granular cork <i>Other</i> : sheep wool, recycled cardboard	FR: 250-3500 Rayl/m; SA: 0.01-0.96. Natural fibres showed high SA values, especially at medium and high frequencies.
Bessa et al. (2017)	Panels	Pressing moulding	AP, ThP	Interior layer: recycled cotton and polyether Intermediate layer: cork (BIO) or grey PU Exterior layer: jute fabric (BIO) reinforcing polyvinyl chloride (PVC), polyester (PET) fabric reinforcing PVC or PET fabric <i>BI</i> : Cyclic olefin copolymer (COC)	R-value: 0.214-0.233 m ² K/W; NRC at 500 Hz: 3.9-8.3 dB. Composite made from PU foams and jute fabric showed good ThP and AP values. R-value of samples was higher than that reported for conventional materials such as gypsum or brick/mortar.
Braiek et al. (2017)	Panels	Moulding	PhP, ThP	<i>BioF</i> : date palm fibres <i>BI</i> : gypsum	D: 736,31-1322.18 kg/m ³ ; Periodical method: TC: 0.174-0.452 W/mK, TD: 2.14-3.542 (x 10 ⁷) m ² /s, TEF: 375.41-757.65 J m ⁻² K ⁻¹ s ^{-1/2} ; HC: 0.81-1.27 (x10 ⁶) J m ⁻² K ⁻¹ ; Flash method: TC: 0.196-0.454 W/mK, TD: 2.234-3.364 (x 10 ⁻⁷) m ² /s, TEF: 412.94-782.87J m ⁻² K ⁻¹ s ^{-1/2} ; HC: 0.87-1.35 (x10 ⁶) J m ⁻² K ⁻¹ ; Energy saving: 61.5% (lower TC). The addition of date palm fibres to the plaster improved ThP of composites. The higher fibre content, the lower D and TC. Composite materials prepared could be used in construction for energy efficiency.
Bujoreanu et al. (2017)	Raw materials	N/S	AP	<i>BIO</i> : wood flour, jute <i>Other</i> : rubber particles, PP, crumbled plastic, cord fabrics <i>Backing plates</i> : plasterboard, oriented strand board and PS	SA: samples with plasterboard showed higher values at 125-250 Hz and lower at 1000-2000 Hz. Sample made from plasterboard covered with cord fabric showed the highest SA values. SA values were lower than the obtained through standard measurements (with a rigid backrest). Samples made with jute and cord fabrics showed good SA values in the considered frequency band. Performance of plasterboard backed samples combined with waste material was much better than PS backed

					samples. Some samples prepared could be used in constructive solutions for SA.
Chen et al. (2017)	Panels	Moulding	AP, HyP, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : miscanthus <i>BI</i> : cement	BI D: 77.6-155.6 kg/m ³ ; Particle D: 173.9-250.0kg/m ³ ; Skeleton D: 1400-1410 kg/m ³ ; Inter-particle porosity: 10.5%-65.1%; Intra-particle porosity: 38.3%-77.2%; WA: 180%-380%; Dry D: 1129-1520 kg/m ³ ; CS: 2.26-28.21 MPa; TS: 180-260 MPa; SA: 0.28-0.63; MOR: 1.12-5.98 MPa. AP values were better for miscanthus fibres of 2-4 mm length than those of 0-2 mm length. SA increased when miscanthus fibres were added to the cement. CS decreased by adding 2-4 mm miscanthus fibres to the cement. MOR remained stable and even increased slightly when 2-4 mm fibres of miscanthus were employed.
Collet et al. (2017)	Raw materials	N/S	HyP, PhP, ThP	<i>BIO</i> : hemp shiv and wheat straw	D: 165.9-187.9 kg/m ³ ; TC: 0.0714-0.0759 W/mK; MBV: 2.17-2.47 g/ (m ² . %RH). The wheat straw stuck well to the hemp shavings. However, for best adhesion, the compound should have at least 15% wheat straw. Composite made from hemp shiv and wheat straw showed adequate TC values due its low-D and showed an excellent hygric property.
Conti et al. (2017)	Raw materials	N/S	HyP, PhP, ThP	<i>BIO</i> : straw bales (spelt, wheat, barley)	D: 65.6-90.75 kg/m ³ ; TC: 0.0555-0.0661 W/mK; MC: 5.1%-7.1%. The heterogeneous nature of the straw bales showed a variability in TC values of about 20%. Therefore, it was difficult to find precise TC values. There were no correlations between TC and D or between TC and MC.
Cravo et al. (2017)	Panels	Hot-pressing moulding	HyP, MeP, ThP	<i>BioF</i> : sugarcane bagasse <i>BI</i> : cement, oil-based PU resin	WA (24 h): 22%, 43%; ST (24 h): 11%, 18%; MOR: 8.85, 25.68 MPa; MOE: 538, 2265 MPa; TC: 0.136 W/mK; R-value: 0.0771 m ² K/W. Both particleboards made from cement-bad, and castor oil-based PU resin coating and particleboards prepared from sugarcane bagasse and castor oil-based bicomponent PU resin showed better ThP, PhP and MeP than materials classified as suitable for construction.
Daeipour et al. (2017)	Panels	Hot pressing moulding	AP	<i>BioF</i> : poplar wood flour <i>BI</i> : LDPE, chalk powder, MAH-PE	Maximum WA: sample with 50% of wood flour, 47% of LDPE and 3% of MAH-PE; Minimum WA: sample with 40% of wood flour, 50% of LDPE and 10% of chalk powder; Maximum SA: >

					2000 Hz of frequencies in the sample with 40% of wood flour, 47% of LDPE, 3% of MAH-PE and 10% of chalk powder; Variance of SA: not significant differences in frequencies 250, 500 and 1000 Hz / significant differences in frequencies 200, 4000 and 6300 (<0.05). The composite made from wood flour, LDPE, MAH-PE and chalk showed the maximum SA at high frequencies and significant differences in the WA to different h.
D'Alessandro et al. (2017)	Raw materials	N/S	AP, Lyfe cycle, ThP	BIO: straw bale (cereal)	Walls prepared from compressed straw bales showed high resistance to flame spread; TC values obtained for straw bale varied depending on the type of straw, water content of samples, D of bales, the size and quantity of air gaps inside and between bales, fibre orientation, bale orientation, the presence of plaster between bales and plaster type and thickness. TC: 0.051-0.053 W/mK; Maximum SA: 0.70-0.78 to 1000-1300 Hz; R-Value: 0.121-0.264 W/m ² K; TT: 0.119-0.253 W/m ² K; SRI: 42-48 dB. Straw bales have a potential for their use in sector of the construction, but several inconvenient were found: the influence of moisture on the durability of the straw, the fire hazard during construction, the limited thermal performance and SIN, and lack of information about it.
Dhakal et al. (2017)	Panels	Hand-pressing moulding	HyP, PhP, ThP	BioF: hemp BI: lime, cement	D: 233.03-697.76 kg/m ³ ; TC: 0.074-0.103 W/mK; Free water saturation: 374.96-423.55 kg/m ³ ; Maximum water content: 525.66-655.31 kg/m ³ . Water content at 80% RH: 17.47-29.08 kg/m ³ ; Porosity: 0.53-0.66 m ³ /m ³ ; WA: 109.24%-228.58%. TC values determined for the different hemp mixtures with cement were greatly influenced by D. As BI content was increased, D and TC values were also increased.
Dukarska et al. (2017)	Panels	Hot-pressing moulding	HyP, MeP, PhP ThP	BioF: particles of rapeseed straw BI: polymeric 4,4'-methylenediphenyl isocyanate and PF-resin	D: 450-650 kg/m ³ ; MOR: 6.74-20.6 MPa; MOE: 1.53-3.610 GPa; IB: 0.31-0.63 MPa; IB after a boil test: 0.12-0.21 MPa; ST: 11.6%-14.7%; TC: 0.008-0.065 W/mK. Particleboards made from rapeseed straw particles could be used in bio houses and eco-housing. To increase the water-resistance of the panels,

Anexo 1: Tabla de revisión bibliográfica

					hydrophobic agents should be applied, or the polymer BI relative fraction increased.
El Azhary et al. (2017)	Panels	Moulding	ThP	BioF: wheat straw BI: clay	D: 1544.98-1985.18 kg/m ³ ; TC: 0.263-0.504 W/mK; TD: 2.858-3.728 (x10 ⁻⁷) m ² /s; SHC: 595.62-678.41 J/kgK. Composite made from unfired clay and wheat straw showed adequate ThP being able to resist the warm and dry climate.
Ferrández-García et al. (2017)	Panels	Hot-pressing moulding	AP, MeP, PhP, ThP	BioF: washingtonia palm tree pruning BI: UF-resin Hardener: ammonium sulphate ((NH ₄) ₂ SO ₄)	D: 677.7-885.8 kg/m ³ ; MOR: 7.21-17.95 MPa; MOE: 0.6651-1.550.5 GPa; IB: 0.98-1.06 MPa; TC: 0.059-0.062 W/mK; R-value: 0.107-0.108m ² K/W; SA: 0.05-0.45. Boards made from Washingtonia palm tree pruning, UF-resin and (NH ₄) ₂ SO ₄ improved the MOR and IB data as D increased. Boards made from small particle size showed highest MeP, but they did not show significant differences in ThP and AP values. Boards showed high SA at frequencies between 125 Hz and 250 Hz and, therefore, it could be classified as class D acoustic panels. Boards could be potentially used as lining and false ceilings.
Fernea et al. (2017a)	Panels	Hand pressing moulding	AP, MeP, ThP	BioF: hemp Other filler: perlite and vermiculite BI: PVA	Fire reaction: samples only resist few seconds at temperature around 950 °C; MOR: 1.1-1.5 MPa; Axial TS: 3.5 MPa (highest value). Composite made from hemp and perlite showed the highest values in MeP and in the fire reaction. The highest SA values were displayed by the composite made from hemp, perlite, and vermiculite, which could substitute synthetic materials and could be employed as sustainable alternative to some construction materials.
Fernea et al. (2017b)				BioF: hemp Other filler: sand BI: white cement	Maximum SA: composite made from 1000 cm ³ of cement, 3000 cm ³ of hemp, 50 cm ³ of water; D: 1257.81-1922.49 kg/m ³ ; TC: 0.1938-0.476 W/mK; Reaction to fire: the composite resist to fire minimum 15 min at temperatures of 950 °C; CS: the highest values were observed for samples with the highest cement content. Composite made from hemp and white cement showed excellent ThP and AP values, but as the amount of hemp was increased in samples, both MeP and FIR were diminished.

Anexo 1: Tabla de revisión bibliográfica

Ghofrani et al. (2017)	Panels	Hot-pressing moulding	AP, HyP, MeP	<i>BioF</i> : date palm branches <i>Other filler</i> : expanded vermiculite <i>BI</i> : UF-resin	MOR: 2.1-7.3 MPa; IB: 0.04-0.43 MPa; WA (2 h): 35%-83%; WA (24 h): 56%-88%; WA (72 h): 64%-89%; ST: 5%-26%; SA: higher values were observed in composite having vermiculite nanoparticles than the composite prepared with vermiculite microparticles. Raising vermiculite amount in the particleboards prepared with date palm branches, expanded vermiculite and UF-resin diminished significantly MOR, MOE, IB values but improved WA, ST and SA data. Particleboards prepared with 20 wt.% of vermiculite microparticles exhibited the highest MOR, MOE and IB values, and the lowest WA and ST values. Particleboards prepared in this work could be potentially used as insulation materials.
Gil-Lopez et al. (2017)	Panels	N/S	AP, Cost evaluation	<i>BioF</i> : palm tree pruning waste <i>BI</i> : dampened topsoil	Soundproofing: 6.4-79.9 dB (100-2500 Hz); Insertion losses: 6.6-27.9 dB (100-5000 Hz). Shredded palm tree pruning waste with dampened topsoil showed good AP. Sample prepared with 50 wt.% of soil and 50 wt.% of chips showed the greatest SA performance.
Gourlay et al. (2017)	Panels	Pressing moulding	AP, HyP, ThP	<i>BioF</i> : hemp shiv and hemp straw <i>BI</i> : cement	AP: low D values led high SRI values (>2 to 4 dB), and narrower SA peak. The presence of moisture in composite particles led to a significant decrease in porosity but, by contrast, an increased in TR. Thermal characteristics: denser samples showed higher TC and SHC values. Both TC values and the SA of samples increased when the humidity increased.
Iannace (2017)	Raw materials	N/S	AP	<i>BIO</i> : straw, hay, plant litter and wood chips	D: 35-200 kg/m ³ ; FR: 300-3200 Rayl/m; SA: 0.40-0.99. Samples made from straw, hay, plant litter and wood chips showed good SA, similar values to those reported for synthetic porous materials. SA increased with increasing sample thickness and maximum coefficients occurred at the lowest frequencies.
Khankhaje et al. (2017)	Panels	Moulding	AP, MeP, PhP	<i>BioF</i> : palm kernel shell <i>Other filler</i> : cockleshell <i>BI</i> : cement	Void content: increase of 1%, 2%, 4%, 17%, 20%, 25%; CS: 2-28 MPa; SA: 0.05-0.10, it was higher in composites than the reference sample of concrete; NRC: 9.03%-22.79%; STC: 20-26 dB, 40-80 dB (reference sample of concrete); Surface D: 34-37 kg/cm ² , 38 kg/cm ² . The higher palm kernel shell and cockleshell

Anexo 1: Tabla de revisión bibliográfica

					content, the higher void content, and the lower CS. It also improved SA and STC was decreased in samples. Kernel shell showed better results than cockleshell, but both could be used as reinforcement of pavement in order to absorb noise produced by tyres and traffic.
Laborel-Préneron et al. (2017)	Particulate samples	Moulding	HyP, PhP, ThP	BIO: barley straw, hemp shiv and corn cob	Pore size: 2-100 μm , 5-40 μm , 20-80 μm ; BD: 57-497 kg/m^3 ; TC: 0.044-0.096 W/mK ; WA: Initial rate of absorption: 48-247. Barley straw showed better results than hemp shiv and corn cob. It was an abundant BIO and the best ThI. However, a drawback was its high WA. All aggregates were suitable for the development of bioconstruction.
Lenormand et al. (2017)	Particulate samples	Hot-pressing moulding	AP, PhP, ThP	BIO: sunflower pith	Microstructure of particles: pores due to the plant cell cavities, cell diameter of 100 μm and microperforation diameter of 5 μm ; D: 50, 75, 100 kg/m^3 ; SA: predominate values lower than 40%, a peak between 4500-6500 Hz; Interparticle porosity: 35%-55%; FR: 800000-3000000 Nm^{-4}s ; E: 6.3-9.6 MPa; SA improvement with perforations: up to 80%; TC: 0.03808-0.0424 W/mK . Particleboards made from sunflower pith showed lower SA values than other samples due to their low permeability; but they exhibited good ThI characteristics. SA was improved by board perforations, but TC values did not. Particleboards could be used as core material for composite boards, low-D material for vehicles, ceiling tiles and decorative board for interior.
Mendivil et al. (2017)	Structural elements	Pressing moulding	HyP, MeP, PhP, ThP	BioF: wood chips from grapevine shoots BI: clay	The dependence of apparent D on the percentage of grapevine shoots was almost linear. The increase of WA through the surface indicated the development of open porosity. The higher grapevine shoots content, the lower TC and CS. Clay-vine shoot composite should be restricted only to the manufacture of cladded walls due to the high values of WA observed. The addition of grapevine shoots reduced TC values of the ceramic product. The use of grapevine shoots could increase energy saving in the kiln due to its energy contribution in combustion.

Nguyen et al. (2017)	Panels	Hot-pressing moulding	HyP, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : bamboo fibres <i>BI</i> : bone glue	D: 311-538 kg/m ³ ; MOE:1310-4341 MPa; MOR: 2.7-14.2 MPa; MBV: 1.7-3.9 g/(m ² , RH); TC: 0.055-0.088 W/mK; Variation of TC with moisture uptake/release: 7.5%-34.2% (increase), 3.5%-19.2% (decrease); coefficients of the relationship between TC and variation MC: R ² = 0.62-0.92. Bamboo fibre panel with a 9 wt.% of lignosulfonate showed the highest flexural properties, and the best moisture damping and MAB value; also, it exhibited highest TC values. Bamboo fibre panels with lower TC values were those in which it was incorporated at around 70 wt.% or 90% of bamboo fibres, but their MeP were quite low. Bamboo fibres could be used as insulation materials in construction.
Or et al. (2017)	Raw materials	Hot-pressing moulding	AP, PhP	<i>BIO</i> : fibres from the oil palm empty fruit bunch (OPEFB)	BD: 116.9-818.4 kg/m ³ ; SA increased as D climbed, thickness and air gap increased; Similar SA was observed for samples with 20 mm of thickness (air gap thickness of 20 mm) and 40 mm of thickness; Maximum SA: 0.9 in average above 1 kHz (40 and 50 mm of thickness). A proper configuration of D and thickness of panel fibres from the oil palm empty fruit bunch could lead to obtain good SA performances. SA could be improved by inserting air cavities behind the panel. The values of absorption were similar to those obtained for synthetic rock wool.
Pásztor et al. (2017)	Panels	Hot pressing	Formaldehyde emissions, PhP, ThP	<i>BioF</i> : black locust shredded bark <i>BI</i> : UF-resin	D: 185.8-548.3 kg/m ³ ; TC: 0.0648-0.0665 W/mK. Panels made from black locust shredded bark and UF-resin showed good TC and they could be used as building insulation materials.
Pedreño-Rojas (2017)	Panels	Pressing moulding	AP, Environmental impacts, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : wood shavings and sawdust <i>BI</i> : gypsum	D: 702-1266 kg/m ³ ; MOR: 1.23-4.01 MPa; CS: 2.17-8.81 MPa; MOE: 449.87-3350.84 MPa; TS: 0.21-0.88 MPa; TC: 0.038-2 W/mK; R-value: 1.583-1.613 m ² K/W; TT: 0.620-0.632 W/m ² K; Average SA: 0.218-0.473; Reverberation time: 0.803-1.571 s. Composite materials made from gypsum and high content of wood shavings and sawdust showed the best eco-efficient characteristics. The addition of wood waste improving the ThP and AP of the composites, but MeP were decreased. Composites

					with a content of wood waste of around 10 wt.% and 20wt.% showed adequate MeP and better ThP and sound properties than gypsum samples.
Pennacchio et al. (2017)	Panels	N/S	AP, Environmental analysis, PhP, ThP	<i>BioF</i> : hemp <i>BI</i> : sheep wool	D: 132-142 kg/m ³ ; TC: 0.038-0.044 W/mK; R-value: 2.5 m ² K/W; TT: 0.42-0.43 W/m ² K; SA: 0.55-0.75. The incorporation of hemp in composites decreased the environmental impact and increased stiffness of prepared samples. Excellent values of TC, SA and TT demonstrated an adequate performance of prepared composites as an insulation to buildings.
Son et al. (2017)	Panels	Pressing moulding	HyP, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : rice husk (natural and collected from water filter of wastewater plant) <i>BI</i> : lime, metakaolin	TC: 0.25-0.31 W/mK; WA: 56.4%-62.5%; CS: 0.36-0.38MPa; TGA: 30-200 °C continuous mass loss until around 2.089%, 200-500 °C mass loss reached 12.851%, 575-800 °C mass loss attained 19.142%. MeP of lightweight concrete made from rice husk, hydrate lime and metakaolin changed over time due to pozzolanic reactivity and natural carbonation reaction. Lightweight concrete showed low TC values; hence, it could be used as ThI. Concrete block could be used for non-load bearing elements in building. Rice husk also could be used of wastewater treatment.
Thilagavathi et al. (2017)	Particulate materials	Moulding	AP, PhP	<i>BI</i> : luffa fibrous, kapok and cotton fibres	Areal D: 200-3000 g/m ² ; NRC: 0.05-0.39. Natural fibrous mats made from luffa fibrous and kapok/cotton web as middle layer showed good NRC. NRC increased with the increased of samples thickness and with the presence of air gaps. The prepared materials could be used for acoustic applications in building and automobiles.
Tůmová et al. (2017)	Panels	Pressing moulding	MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : rye straw <i>BI</i> : casein	BD: 72-93 kg/m ³ ; TC: 0.045-0.056 W/mK; R-value: 1.49-1.8 m ² K/W; MOR: 0-1 MPa. Panel made from rye straw and casein showed better consistency adding cut straws, but the presence of uncut straws led better ThP. Casein resulted a good BI option which hardened quickly is biodegradable, but expensive. Composite panel could be used in buildings but after a proper surface treatment to avoid water damage and mildew.

Anexo 1: Tabla de revisión bibliográfica

Wang et al. (2017)	Raw materials	N/S	AP, PhP	BIO: poplar wood	Microstructure: formation of great content of voids in wood decay samples; BD: 158-377 kg/m ³ ; Total pore area: 1.191-2.495 m ² /g; APD: 1909.5-12234.6 (4V/A)/nm; Porosity: 39.0%-77.66%; SA: 0.054-0.493. SA values achieved with poplarwood decay samples were higher than values observed with samples made from healthy wood. Decay of wood helped to decrease D values, but the porosity, pore size, and connectivity for pit membranes disappeared and new voids increased.
Yang (2017)	Panels	N/S	ThP	BioF: straw BI: concrete	Sandwich insulation materials made from concrete and straw showed good heat insulation. Energy Saving Design Standard for Construction of Residence in Shandong Province in China (DBJ 14-2012) has established a winter heat consumption index in Jinan of 14.8 W/m ² . Heat consumption index obtained in an experiment was 9.35 W/m ² . Power consumption index measured in summer showed advantages of good insulation properties.
Zhang et al. (2017)	Panels	Hot-pressing moulding	HyP, MeP, ThP	BioF: bamboo paper secondary sludge BI: UF-resin Other: fly ash floating beads	MOR: 1.469-3.292 MPa; MOE: 396.45-1246.5 MPa; ST: 1.2%-2.18%; TC: 0.12-0.165 W/mK. Optimized composite made from bamboo paper sludge and fly ash floating beads were those prepared with particle size range of 20-40 mm, a weight ratio of sludge: fly ash floating beads of 80:20 and a thickness of 14 mm. TC values obtained were within the required specifications for ThI. Thus, composites prepared could be used as ThI material to construction.
Ahmad et al. (2018)	Panels	Pressing moulding	HyP, MeP, PhP, ThP	BioF: corn stalk BI: cement Other: sand, fly ash	Pore size of corn stalks 120-135 μm, 75-90 μm; WA: 165.25-222% (30 min) and 48-59% (24 h); D: 557-1854 kg/m ³ ; CS: 2.6-28.4 MPa; TC: 0.051-0.998 W/mK. Composite prepared from corn stalks and cement showed better properties (mainly those related to ThI, CS, and microstructure analysis) than other materials (e.g. hemp). Samples obtained with corn stalks and cement met mechanical and thermal requirements to be used as ThI and structural materials in construction.

António et al. (2018)	Panels	Hot-pressing moulding	AP, MeP, ThP	<i>BioF</i> : rice husk, expanded cork granules <i>BI</i> : TDI-based PU pre polymer	BD: 298-433 kg/m ³ ; TC: 0.060-0.0827 W/mK; CS: 47-427 kPa; Weighted reduction of impact sound pressure: 20-27 Db; SA: maximum 0.96 (1250 Hz) (50/-/50). Composites boards made from rice husk, expanded cork granules and BI were considered appropriate lightweight materials due their low D values. CS was adequate for floor and wall applications. Composites boards showed low TC and could be used in floating floors to reduce the impact sound transmission. SA values obtained were promising and comparable with some commercial materials.
Babenko et al. (2018)	Panels	N/S	ThP	<i>BioF</i> : flax straw <i>BI</i> : liquid glass	Temperature ranges of degradation: 66 °C, 70 °C (first peak); 355 °C, 280 °C (second peak); Total mass loss: 95.56%, 58.02%; D: 311.7 kg/m ³ , 336.2 kg/m ³ ; HF: 24.416 W/m ² , 29.904 W/m ² ; TC: 0.08410 W/mK, 0.08464 W/mK. Flax straw showed high ThP when 100 wt.% flax straw was employed. The rough surface of flax straws and good TC values obtained suggested that materials prepared were suitable as insulators for buildings.
Balo y Sua (2018)	Panels	N/S	MeP, PhP, Techno-economic energy efficiency evaluation, ThP	<i>BioF</i> : hemp fibre <i>BI</i> : clay, epoxidized hemp oil <i>Other</i> : fly ash, expanded perlites	D: 1383-1609 Kg/m ³ ; TC: 0.275-0.498 W/mK; CS: maximum 13.98 MPa; TS: 1.230-1.308 MPa. Hemp-based composite materials could reduce TC. The production of hemp compound for insulation provides energy savings.
Barreca et al. (2018)	Panels	Pressing moulding	ThP	<i>BioF</i> : agglomerated cork and giant reed (<i>Arundo donax</i> L) <i>BI</i> : urethane, melaminic, PF-resin and UF-resin	Brick wall:_TC: 0.35-0.84 W/mK; SHC: 800-840 J/kgK; Transmittance: 2.450 W m ⁻² K ⁻¹ . Cork agglomerated wall:_TC: 0.04-0.13 W/mK;_SHC: 1700-1888 J/kgK;_Transmittance: 0.279 W m ⁻² K ⁻¹ . Giant reed wall: TC: 0.0630 -0.16 W/mK; SHC: 1000 J/kgK; Transmittance: 0.604 W m ⁻² K ⁻¹ . Panels made from cork layers and giant reed improved thermal comfort without emitting toxic substances. Samples also showed good ThP and significant. The environmental effects caused by prepared samples were less than those observed for other building

					materials. Natural materials used were easily recyclable, allowing their reuse in other applications such as packaging.
Bakatovich et al. (2018)	Panels	Pressing moulding	HyP, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : rye straw, barley straw, wheat straw, oats straw, rice straw, flax fibres and rice husk <i>BI</i> : liquid glass, emulsion of PVA, latex	D: 200-235 kg/m ³ ; CS: 0.23-0.65 MPa; MOR: 0.34-1.03 MPa; TC: 0.049-0.069 W/mK; The increase in humidity led to an increase in D by almost 38-53% and in TC by 1.8 to 2.1 times; R-value: 1.90 (m ² K)/W, 1.46 (m ² K)/W. Composites prepared with two kinds of fibres having different size and shape exhibited the best thermophysical and mechanical performances, ensuring an optimal structure of ThI materials.
Belakroum et al. (2018)	Panels	Moulding	AP, HyP, MeP, ThP	<i>BioF</i> : date palm fibres <i>BI</i> : lime	TC: 0.06127-0.06305 W/mK; HC: 1.77-2.23 x 10 ⁵ J/m ³ K ^o ; TD: 2.76-3.55 x10 ⁻⁷ m ² /s; MBV: 1.6301-3.7301 g/m ² RH%; E: 20.74-67.51 MPa; MOE: 5-35 MPa; CS: 0.2-0.6 MPa; SA: 0.5-0.65 (medium frequencies), 0.4-0.6 (high frequencies). The higher date palm fibre content, the lower TC, and the higher moisture damping and SA, but reduced MeP although the mechanical values were still enough to ensure safety and better than other existing insulation materials.
Borges et al. (2018)	Panels	Moulding	AP, MeP, PhP	<i>BioF</i> : rice husk <i>BI</i> : cement <i>Other</i> : ethylene-vinyl acetate (EVA) waste	D: 930.5-1850 kg/m ³ ; Resonance frequencies: 81-250 Hz; Dynamic stiffness: 51.3-488.3 Hz; Impact sound pressure level: 6.8-22.5 Db. Composite materials made from rice husk and ethylene-vinyl acetate (EVA) were suitable for reducing of impact sounds in floor systems. The substitution of sand for rice husk and EVA reduced the D and increased the impact SIN.
Brouard et al. (2018)	Panels	Pressing moulding	ChP, HyP, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : rapeseed straw, sunflower bark and pith. <i>BI</i> : clay	BD at dry state: 64.9-129.3 kg/m ³ ; TC at dry state: 0.036-0.053 W/mK; Dry D: 235-714 kg/m ³ ; TC: 0.055-0.1578 W/Mk; CS: 0.16-2.1 MPa. Composite prepared with sunflower marrow showed the greatest lightness and the lowest TC, but worst results in CS.
Buratti et al. (2018)	Panels	N/S	AP, Life cycle analysis, ThP	<i>BioF</i> : rice husk <i>BI</i> : PU glue and gypsum	TC: 0.070 W/mK; Heat flux: 20.04 W/m ² ; R-value: 0.58 m ² K/W; FR: 11.700 Pa s/m ³ ; Porosity: 59.7%; Tortuosity: 1.33; SA of functional unit: 0.33. Rice husk-based panels exhibited an appropriate R-value, good behaviour at mean-high sound wavelengths and quite low environmental impact during

Anexo 1: Tabla de revisión bibliográfica

					manufacture. Hence, these panels were one of the best solutions for ThI and SIN applications.
Chin et al. (2018)	Panels	Hot-pressing moulding	AP, MeP, PhP	<i>BioF</i> : kenaf fibre <i>BI</i> : PLA	SA: maximum 0.987 (1521.02 Hz); Porosity: 0.39%-2.70%; TS: 55.83-67.17 MPa. Different proportions of kenaf and PLA influenced thickness and porosity of samples which affected also SA values. The higher kenaf content, the higher porosity, and the lower TS.
Degrave-Lemeurs et al. (2018)	Panels	Pressing moulding	AP, MeP, PhP	<i>BioF</i> : hemp <i>BI</i> : clay	Open porosity: 41.9%-91.7%; D: 1788-2128 kg/m ³ ; Dry D: 219-330 kg/m ³ ; E: 2.2-16.5 MPa; Acoustical porosity: 0.48-0.62; SA max: 1.90-2.60; SA: 0.6-1 to 500-1200 Hz (<375 kg/m ³) and 0.3-0.8 (375-500 kg/m ³). Hemp-clay- and hemp-lime-based composites exhibited similar SA values, but absorption peak width was narrower for hemp-lime-based composite and AR values was higher for hemp-clay-based composites.
D'Alessandro et al. (2018)	Panels	N/S	AP, HyP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : kenaf, cork <i>Other</i> : mineral wool, PU foam, melamine foam	D: 8.2-111.7 kg/m ³ ; TC: <0.035 W/mK (melamine foam), 0.035 W/mK (mineral wool), 0.022-0.040 W/mK (PU foam), 0.034-0.043 W/mK (kenaf), 0.037-0.050 W/mK (cork); SHC: 1.03–1.70 kJ/kgK; SA: 0.85-0.87 (mineral wool), 0.37-0.41 (cork), 0.65-0.68 (kenaf), 0.75-0.76 (PU foam), 0.8 (melamine foam). The higher water content, the higher TC. The highest modifications were observed for kenaf and melamine foam combinations.
Ferrández-García et al. (2018)	Particulate samples	Hot-pressing moulding	HyP, MeP, PhP, ThP	<i>BIO</i> : palm tree pruning (canary, date and Washingtonia palms)	D: 746.30-878.25 kg/m ³ ; ST: 19.99%-37.83% (2 h), 31.96%-49.74% (24 h); WA: 47.84%-72.14% (2 h), 61.26%-85.91% (24 h); MOR: 7.38-19.85 MPa; MOE: 0.663-2.019 GPa; IB: 0.72-0.99 MPa; TC: 0.053-0.061 W/mK. Palm fibre-based samples showed similar properties than wood-based samples. Overall, properties depended on tree types and particle size, being the canary palm with the small particles those that showed the best MeP and ThP. Both palm fibre-based samples and wood-based samples showed low TC values.
Fino et al. (2018)	Structural elements	N/S	HyP, PhP, ThP	<i>BIO</i> : agglomerate cork	TC: 0.042 W/mK; SHC: 1530 J/kgK; D: 156 kg/m ³ ; Water content: 0.022 kg/kg. Wall covered with uncoated medium D

					agglomerate cork board absorbed water. Temperature of water was a key factor with a higher impact in the wall temperature change.
Georgescu y Cosereanu (2018)	Panels	Hot-pressing moulding	AP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : wood fibres <i>Other filler</i> : recycled rubber crumbs <i>BI</i> : acrylonitrile butadiene styrene (ABS)	TC: 0.0434-0.0573 W/mK; Morphology: core looked more porous; SA: 0.49-0.84. Samples made from wood fibres, recycled rubber crumbs and acrylonitrile butadiene styrene (ABS) having the highest content of recycled rubber and wood fibres as fillers decreased significantly their thermal performance. The addition of ABS increased the AP of samples
Ibragimov et al. (2018)	Panels	N/S	ThP, PhP, HyP, MeP	<i>BioF</i> : flax <i>Other filler</i> : cotton waste <i>BI</i> : PF-resin	D: 264-275 kg/m ³ ; MOR: 0.32-0.63 MPa; ST: 7.5%-20.5%; WA: 130%-215%; TC: 0.050-0.09 W/mK. The plates could be used as heat-insulating element in construction.
Islam y Alam (2018)	Panels	N/S	AP, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : bamboo, banana and hemp fibres <i>BI</i> : polyester and PP	TS: 24-280 lbf/in ² ; Areal D: 664-982 g/m ² ; TC: 0.0176-0.0348 W/mK; SA: composite prepared with bamboo was greater at 80-3880 Hz than that obtained from banana and hemp; the highest SA was observed at 1240 Hz for all the samples and the lowest values were detected at 840 Hz; SRI: the lower the sound passes through the nonwoven material the higher SRI. Natural fibre composites could replace materials such as fibreglass or foams inside a car for noise control purposes. Banana-based composites exhibited better ThP than bamboo- and hemp-based samples. Bamboo-based composites could be used inside a vehicle because their high SA, stiffness and TS values, adequate TC values and low EL and water permeability.
Kain et al. (2018)	Panels	Hot-pressing moulding	HyP, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : larch bark particles <i>BI</i> : UF-resin	D: 219-490 kg/m ³ ; MOR: 0.04-1.77 MPa; MOE: 0.0025-0.482 GPA; IB: 0.01-0.40 MPa; WA: 33.48%-56.86%; ST: 4.56%-10.44%; TC: 0.05647- 0.10320 W/mk. Larch bark-based panels with a vertical orientation showed better MeP, while those with a horizontal orientation exhibited lesser TC values. Larch bark-based panels could have potential applications such as insulation layers and efficient solid constructions.
Karaky et al. (2018)	Panels	Pressing moulding	AP, HyP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : beet pulp <i>BI</i> : potato starch	AD: 271.4-360 Kg/m ³ , 1222.18-1293.42 kg/m ³ ; Porosity: 70.60%-79.75%, 72.16%-77.79%; SA: maximum about 0.72 in 4000 Hz

		and freezing			(0.1) and 0.6 in medium frequencies; TC: 0.069-0.075 W/mK; TD: 1.47×10^{-7} - 1.76×10^{-7} m ² /s; TEF: 165.5-186.8 J K ⁻¹ m ⁻² s ^{-1/2} ; Water permeability: 6.86-8.90 Kg m ⁻¹ s ⁻¹ Pa ⁻¹ ; MBV: 2.62-2.80 g m ⁻² % RH ⁻¹ . SA values depended on beet pulp and potato starch-based samples humidity and porosity. Samples with a 10 wt.% of potato starch showed the highest SA values. Considering TC and diffusivity values, and its TEF results, beet pulp and potato starch-based composites could be used for ThI. The higher potato starch content, the higher TC and D.
Kim et al. (2018)	Panels	Moulding	AP, MeP, PhP	<i>BioF</i> : cellulose fibre <i>Other filler</i> : aluminium powder, zeolite <i>BI</i> : concrete	CS: 15.2-69.9 MPa; SA: 0.215-0.25 to 200-2500 Hz. The addition of cellulose fibre in concrete increased CS and SA. Concrete-based composites containing aluminium powder and cellulose fibre exhibited high durability and good resistance to both freezing and thawing.
Lecourt et al. (2018)	Panels	Moulding	AP, ChP, PhP	<i>BioF</i> : hardwood <i>Other filler</i> : kraft pulp <i>BI</i> : microfibrillated cellulose from softwood pulp	D: 39-47 kg/m ³ ; AFR: 25-1163 k Pas m ⁻² . X-ray densitometer was faster and easier to carried out, but X-ray tomography visualized the impact of different materials and manufacturing processes. Airflow resistance of the material made from kraft pulp and hardwood correlated well with the highest D board.
Lim (2018)	Particulate samples	Hot-pressing moulding	AP	<i>BIO</i> : kenaf fibres	SA increased as the thickness of samples increased. The addition of air voids inside the samples improved SA; The higher D, the higher SA; SA: > 0.5, only was < 0.5 in samples with a thickness of 15 mm. Kenaf fibres showed good SA performance. Samples with thickness of 40 mm and BD of 93.5 kg/m ³ showed the highest SA values which around 0.8 at 1500 Hz.
Liuzzi et al. (2018)	Panels	Moulding	HyP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : olive fibres (leaf and branches) <i>Other filler</i> : sand, gravel <i>BI</i> : clay	Porosity: 0.38-0.44; BD: 1409-1669 kg/m ³ ; True D: 2601-2724 kg/m ³ ; Ideal MBV: 1708-1739 g/(m ² %RH). The higher olive fibres content, the higher porosity, and the lower D and TC. Composite could exchange humidity with neighbouring environment due its high values of MBV.
Martellotta et al. (2018)	Panels	Pressing moulding; Moulding	AP, PhP	<i>BioF</i> : leaves from olive pruning wastes <i>BI</i> : chitosan, lime	Normal incidence SA: 0.3-0.9 (500 Hz- 1kHz); FR: 1000-4200 Pa.s/m ² ; Porosity: 0.84%-0.96%; Tortuosity: 1.90%-2.03%. Composite prepared with leaves from olive pruning and

					chitosan had low environmental impact because BI was completely biological. Well compacted samples showed better AP than no compacted samples. Sample with higher AFR showed the best result of SA. Panel made from leaves of olive pruning and chitosan could be manufactured just like the mineralized wood wool panel and replacing the cement with the chitosan.
Masri et al. (2018)	Panels	Moulding	MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : date palm leaves <i>BI</i> : recycling EPS waste	D: 542.41-824.05 kg/m ³ ; MOE: 0.1177-0.7616 GPa; TC: 0.1122-0.1588 W/mK. Due to its MeP and ThP, composites made from date palm leave could be used as insulating materials. TC values showed that the composites prepared in this work were twice as insulating as a similar wood waste-based material.
Mirski et al. (2018)	Panels	Pressing	AP, ThP	Core layer: hemp fibres (BIO) Outer layer: birch veneers <i>BI</i> : polymeric 4,4'-methylenediphenyl isocyanate	TC: 0.08-0.14 W/mK; TC for board without veneer: 0.035 W/mK; NRC: 4.9-52.2 dB; Total weight loss at 600 °C: 68.0% (hemp), 72.1% (birch veneer); Maximum decomposition temperature: 336.9 °C; Surface Burning: 36.6%-63.2%. TT of samples made from hemp fibres without birch veneers allowed to use boards as insulation materials. Board fabricated with the birch veneers showed high heat transfer coefficient, but these values were lower than those reported for wooden boards.
Nguyen et al. (2018a)	Panels	Hot-pressing moulding	HyP, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : bamboo powder <i>BI</i> : nerve glue, bone glue and sodium lignosulfonate	D: 628-817 kg/m ³ ; TC: 0.101-0.201 W/mK; TC/variation of MC: 1.9x10 ⁻³ -8.7x10 ⁻³ ; Moisture increase variation: 1.6%-7.6%; MOE: 1.424-5.89 GPa; MOR: 2.7-15 MPa. Bamboo composites were ecological and could be used in construction as bio-insulators because they exhibited good hygrothermal behaviour.
Nguyen et al. (2018b)	Panels	Hot-pressing moulding	HyP, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : bamboo fibres <i>BI</i> : protein-based bone glue	D: 246-534 kg/m ³ ; MOE: 1.310-3.200 GPa; MOR: 2.7-7.3 MPa; ST: 82%-193%; WA: 93%-242%; TC: 0.0555-0.0911 W/mK; MC: 6.50%-7.5%; PSD: 0.005-100 µm; APD: 219 nm, 1135 nm; Coefficients of TC-MC relationship: R ² = 0.70-0.91. Particleboards made from bamboo fibres and protein-based bone glue with lower porosity showed the best MeP. TC values were quite low for samples and related to the RH and MC values; when RH and MC values increased, TC also increased.

Anexo 1: Tabla de revisión bibliográfica

Oancea et al. (2018)	Panels	Moulding	AP, MeP	<i>BioF</i> : corn cob granules, shredded sunflower stalk <i>Other filler</i> : sheep wool <i>BI</i> : cement Other: PS granules, PET granules, sheep wool	D: 1775-2273 kg/m ³ ; CS: 10.21-36.1 MPa; SA: 0.152-0.240 to 125 Hz, 0.140-0.223 to 250 Hz, 0.075-0.164 to 500 Hz, 0.144-0.496 to 1000 Hz, 0.159-0.462 to 2000 Hz; NRCs: 0.157-0.285. Materials with the best performance were corn cob concrete with the smallest thickness and PET concrete with the thickest. The addition of aggregates to cement created new materials that could be used as acoustic barriers.
Pavelek et al. (2018)	Raw materials	N/S	HyP, PhP, ThP	<i>BIO</i> : wheat straw	D: 104 kg/m ³ ; HFR: 28.16-29.38 W; R-value: 3356 m ² K W ⁻¹ ; TT: 0.298 W m ⁻² K ⁻¹ ; TC: 0.047 W/mK; Average SHC: 1.8 KJ kg ⁻¹ K ⁻¹ (compact anatomical structure) and 1.9 KJ kg ⁻¹ K ⁻¹ (powder). Panel filled with wheat straw could be used to replace mineral wool in ThI.
Petrella et al. (2018)	Panels	Pressing moulding	AP, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : cellulose fibre from wheat straw <i>BI</i> : cement	TC: 0.16-2.06 W/mK; TD: 1.66x10 ⁻⁷ -1.24 x10 ⁻⁶ m/s ² ; VHC: 9.48x10 ⁵ -1.68x10 ⁶ J/m ³ K; MOR: decreased when the amount of straw increased; CS: increment of fibres in samples reduced resistance more than 30-40% of standard mortar values, but the values were within the range of those reported for gypsum; SA: 4.1-67.1 at 250-1600 Hz. The increase in cellulose fibres extracted from wheat straw content improved ThP and AP of cement mortars. The higher fibre content, the lower MeP. The higher porous structure of the mortars and the voids at the organic/inorganic interface, the lower MeP.
Piégay et al. (2018)	Panels	Hot-pressing moulding	AP, PhP	<i>BioF</i> : flax retted wool and hemp wool <i>BI</i> : polymer fibres	BD: 45 kg/m ³ , 67 kg/m ³ ; Porosity: 96.4%, 96.1%; SA: Hemp wool reached maximum absorption at lower frequencies than flax wool; Incidence transmission loss: flax wool has higher values than hemp wool. The Tarnow models are analytical models allowed to link microscopic parameters with the materials' macroscopic properties. Vegetal fibres exhibited high size distribution heterogeneity than mineral fibres. Simulations performed with composite prepared with a thickness of 50 mm and a proportion of polymer fibres of 15 wt.% suggested better approximations for SA than Tarnow model. Proposed model

					could be used to estimate the influence of the polymer fibres on the SA.
Srisuwan et al. (2018)	Structural elements	Moulding by hand	ChP, HyP, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : grass, coconut husk, and sugarcane bagasse <i>BI</i> : clay	BD: 1350-1750 Kg/m ³ ; WA: 27.40%, 19.80%, 23.10%; Highest porosity: 32%, 34%, 27.10%; CS: 3.18-9.84 MPa, 3.30-10.4 MPa; 2.98-7.96 MPa; TC: 0.21-0.36 W/mK, 0.27-0.41 W/mK, 0.29-0.45 W/mK. The addition of grass, coconut husk and sugarcane bagasse to bricks improved its ThP but at the same time also reduced its CS values.
Somé et al. (2018)	Panels	Moulding	ThP	<i>BioF</i> : hemp particles <i>BI</i> : cement, lime	TC: 0.06-0.17 W/mK; TC decreases about 8%-30% when amount hemp particles in samples was increased; Volumetric specific heat: 183-642 x10 ³ J/m ³ K ⁻¹ ; Volumetric specific heat decreases about 62-65% with the increase of particles amount. TC reached higher values when BI was based on 70 wt.%-natural lime, 30 wt.%- hydraulic lima and pozzoulane than when BI was based on natural prompt cement plus retarding additive.
Vahnina et al. (2018)	Panels	Moulding	HyP, MeP, ThP	<i>BioF</i> : spinning of flax and cotton fibres <i>BI</i> : UF-resin	Strength: 0.23-0.84 MPa, 0.38-0.9 MPa; ST: 4.1%-7.5%, 3.3%-6.1%; WA: 134%-193%, 58%-101%; TC: 0.086-0.095 W/mK, 0.058-0.068 W/mK. Samples prepared with spinning of flax and cotton fibres as reinforcement, and UF-resin as BI showed high water resistance. The kind of additives added to the BI did not significantly affect the TC values of the final material. Ammonium powder additives with a drying temperature of 100 °C and the ammonium chloride (NH ₄ Cl) additive at 170 °C led samples which showed the best PhP and MeP.
Xu et al. (2018)	Structural elements	Steel structure with straw panels and concrete filling	Energy dissipation, MeP, ThP	<i>BIO</i> : straw	Walls manufactured with concrete and straw boards showed excellent ThP and could withstand compression forces and high strength by restricting lateral deformation. Increasing the cross-sectional area of the bolt and the degree of strength of concrete improved SS, ductility, lateral stiffness and dissipation energy. The length increase of the cutting wall could improve lateral stiffness and capacity cutting. The cracking of the concrete and straw walls led good ductility and energy absorption. The seismic behaviour of cold-formed steel high-strength foamed

Anexo 1: Tabla de revisión bibliográfica

					concrete shear walls was higher than that reported for traditional cold-formed steel shear walls.
Almalkawi et al. (2019)	Panels	Moulding	ThP	<i>BioF</i> : ground wood, wheat straw, and cellulose <i>BI</i> : aerated slurry	TC: Ground wood: 0.0516 W/mK, Wheat straw: 0.0379 W/mK and Commercial cellulose: 0.0389 W/mK. Porosity and PSD influenced final TC values measured. Thermal mass of the aerated slurry-infiltrated mesh building system benefited its energy-efficiency when it is compared with an equivalent building fabricated with wood.
Almeida et al. (2019)	Structural elements	N/S	ThP	Layers: concrete slab covered with a waterproof membrane Insulation cork board (BIO) Substrate layer with vegetation	Temperature gap: 1.15-13,4 °C; Average heat flux drops: 5.3-2.95 W/m ² ; TC: 0.04 (cork)-0.13 W/mK. Roof system fabricated with a concrete slab covered with a waterproof membrane, an insulation cork board, and a substrate layer with vegetation showed the best ThI capacity. The insulation cork layer could replace other polymeric products, being this a more eco-efficient solution.
Antunes et al. (2019)	Panels	Moulding	HyP, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : rice husk <i>Other filler</i> : earth <i>BI</i> : gypsum, lime	TC: 0.102-0.197 W/mK; D: 650.8-1021.6 kg/m ³ ; MOR: 0.08-0.12 MPa; CS: 0.13-0.40 MPa. Composites made from rice husk and gypsum exhibited acceptable MeP regarding other biobased materials but an increase in the quantity of rice husk in samples led to a decrease in the flexural properties and CS values. Composites showed a negative impact on ultrasound propagation speed and wear resistance due its low homogenous compaction. The higher rice husk content, the lower D and TC. Although the composites made of rice husk and gypsum did not minimise the TC values as much as desired, these samples could be used as a coating for interior walls and ceilings to improve their ThP.
Bakatovich y Gaspar (2019)	Panels	Pressing moulding	MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : Sphagnum moss, rye straw and reed (<i>Phragmites communis</i>) <i>BI</i> : liquid sodium silicate	Microstructure of the stems: Rye straw: outer part with capillaries with a very minor diameter tan capillaries of inner parts; Reed: outer part has a dense structure while in the inner part increase the diameter of capillaries. D: 120-300 kg/m ³ ; TC: 0.034-0.075 W/mK; CS: 0.05-0.30 MPa; MOR: 0.08-0.26 MPa. The higher liquid sodium silicate content, the higher D, CS and TC. A

					unique composite material made from Sphagnum moss and agricultural waste (rye straw and common reed) was manufactured. There are not similar products on the construction market to ThI.
Bertolini et al. (2019)	Panels	Hot-pressing	AP, HyP, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : particles of Pinus treated with a copper <i>BI</i> : a polyol derived from vegetable castor-oil and a polyfunctional isocyanate	D: 590 kg/m ³ , 550 kg/m ³ ; ST 2 h: 4.93%, 3.58%; ST 24 h: 8.39%, 6.39%; MOR: 4.03 MPa, 6.6 MPa; MOE: 449.86 MPa, 759.08 MPa; IB: 1.46 MPa, 1.34 MPa; Total pore area: 14.12 m ² /g, 9.23 m ² /g; Mean diameter of pores: 30.02 μm, 19.15 μm; Porosity: 55.7%, 53.64%; SA max: 0.8 at 3.2 kHz; TC: 0.11 W/mK. The compressive force applied during the manufacture of pine-based materials influenced their properties. High pressures enhanced their MeP but reduced porosity and, therefore, SA. Low pressures led to the best material characteristics for its use in thermoacoustic insulation.
Brás et al. (2019)	Panels	Pressing Hand moulding	AP, HyP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : barley straw, hemp shiv and rice husk fibres <i>BI</i> : gypsum, lime	TC: 0.102-0.530 W/mK; BD: 651-1808 kg/m ³ ; MBV: 4.11-4.54 (rice husk); Ultrasound propagation velocity: rice husk led to the highest values because of its highest BD, while barley straw and hemp shiv were more porous (lower BD). The casting method could influence the properties of the bio-based materials obtained. The casting method which used gypsum and air lime stabilised-based earth blocks and rice husk was the most favourable one. This method could lead to a more homogeneous fibre distribution, reducing TC, BD, and the velocity of ultrasound propagation values.
Cascone et al. (2019)	Structural elements	N/S	AP, PhP, ThP	<i>BIO</i> : straw bales	Dry D: 77.20-78.57 kg/m ³ ; TC of straw bales: 0.0520-0.0643 W/mK; TC of walls: 0.069 W/mK; D of walls: 78 kg/m ³ ; SHC of walls: 600 J/kgK; Reverberation time: 0.41-2.18 s; Weighted apparent SRI: 49 d. Straw bales showed a good ThP and AP, even higher than EPS.
Çavuş et al. (2019)	Raw materials	N/S	ThP	<i>BIO</i> : 31 different wood species	TC: 0.090-0.197 W/mK; D: 340-894 Kg/m ³ . TC of wood species varies significantly. Oak specie showed the highest TC value and Canadian poplar showed the lowest one.

Anexo 1: Tabla de revisión bibliográfica

Czajkowski et al. (2019)	Particulate samples	Moulding	PhP, ThP	<i>BIO</i> : corn (stalk leaves, husks cover leaves, stalk pith, stalk outer layer)	SHC: 1484-1723 J/kgK; Volumetric SHC: 0.243-0.382 MJ/m ³ K; D: 148.3-257.5 kg/m ³ . Different parts of corn stover showed different specific heat and VHC values. Cobs showed quite low specific heat, and the husk showed high values of specific heat. Leaves and stalk showed similar specific heat and volumetric SHC. Thus, the other parts (husks cover leaves, stalk pith and stalk outer layer) should be analysed separately. Some parts of corn stover could be used to develop insulation materials to construction.
Echeverria et al. (2019)	Panels	Hot-pressing moulding	AP, PhP	<i>BioF</i> : wood <i>Other filler</i> : textile fleece, polyester (PET) fibres, polyester-wool blends, wool-acrylic, mattresses foam <i>BI</i> : UP-resin and PP	Microstructure: larger hollow gaps along the fibres of 50-80 µm, 80-100 µm and > 100 µm showed low sound dissipation; Macropore size: 5-100 µm; Micropores volume: 36%-40%; SA: 0.03-0.78. Composites made from UP-resin and polypropylene (PP) as matrix and textile fleece, polyester fibres, polyester-wool blends, wool-acrylic, mattresses foam and wood as filler exhibited low SA values at mid-frequencies and high SA values at high frequencies. Samples prepared from textile, wool-acrylic, wool-polyester and wood- PP showed the highest SA values.
Elsacker et al. (2019)	Panels	Moulding	ChP, HyP, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : hemp, flax, flax waste, soft pine wood and wheat straw <i>BI</i> : mycelium <i>Other</i> : white-rot fungi	D: 94-135 kg/m ³ ; TC: 0.0404-0.0578 W/mK; Average WA rate: 0.0073-0.0147 mm/s ^{1/2} ; WA (24 h): 24.45%-30.28%; CS: 0.35-0.45 MPa; E: 1.14-1.32 MPa. Samples properties depended on fibre sort employed as aggregates. Composites made with flax, hemp and flax waste as aggregates displayed the best performance. Composites made from mycelium and hemp, flax, flax waste, soft pine wood and wheat straw could be used to replace ThI foams if their MeP were improved.
Ezenwa et al. (2019)	Structural elements	Hot-pressing moulding	HyP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : breadfruit seed coat <i>BI</i> : recycled LDPE	D: 591-897 kg/m ³ ; WA: 0.31%-24.8%; ST: 0.91%-29.8%; TC: 0.19-0.98 W/mK. The higher compressive load and press time, the higher D, and the lower SW and TC. The lower pressure and press time, the higher WA. Breadfruit seed coat could be an adequate filler material to be combined with recycled LDPE.

Anexo 1: Tabla de revisión bibliográfica

					Composite material made from breadfruit seed coat and recycled LDPE could be used as ceiling boards in buildings.
Fernea et al. (2019)	Panels	Pressing moulding	AP, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : hemp <i>BI</i> : white cement	SA: <0.3 at 50-6400 Hz; TC: 0.0922-0.1819 W/mK; D: 966.73-1060.94 kg/m ³ ; MOR: 0.1-0.5 MPa; CS: 0.1-1 MPa. In samples prepared from hemp and earth clay, a composition should be found that increases the number of pores and therefore enhances the SA. A composition ratio clay: hemp of 1:2 led to the lowest TC value. A composition ratio clay:hemp of 1:1 led to the highest MOR. A composition ratio clay: hemp of 1:3 clay-hemp led to the highest CS. MOR and CS values were quite poor, but these could be improved with the use of other BIs.
Ferrández-García et al. (2019)	Panels	Hot-pressing moulding	HyP, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : giant reed particles <i>BI</i> : citric acid	Nominal D: 600-850 kg/m ³ ; MOR: 1.70-12.51 MPa; MOE: 259.97-2439.94 MPa; IB: 0.07-0.61 MPa; ST: 17.98%-38.99%; TC: 0.081-0.093 W/mK. Biocomposites made from giant reed and citric acid could be used as insulating material due to their appropriate MeP and ThP. Biocomposites including a 10 wt.% of citric acid exhibited excellent performance against water. Biocomposites preparation generated low energy costs and presented some environmental benefits.
Florea y Manea (2019)	Panels	Moulding	PhP, ThP	<i>BioF</i> : hemp <i>Other filler</i> : sheep wool <i>BI</i> : white cement, gypsum	D: 332-600 kg/m ³ ; TC: 0.046-0.073 W/mK. To use the composite as ThI material in construction, the TC should be lower than 0.065 W/mK, hence only the composites made from 35 g of sheep wool with the BI or 35 g of hemp fibres with the BI showed good TC.
Georgescu et al. (2019)	Structural elements	N/S	PhP, ThP	<i>BIO</i> : reed straws <i>Other</i> : rock wool, EPS	D: 94.85-158.07 kg/m ³ ; TC: 0.049-0.120 W/mK. Walls with thinner air layer showed lower TC. The lowest TC was recorded for three-layer of rock wool, followed by the wall with three layers of EPS. All the walls with reed straws showed higher TC than those walls with rock wool and EPS.
Georgiev et al. (2019)	Panels	Pressing moulding	HyP, ThP	<i>BioF</i> : cattail leaves (typha) <i>BI</i> : magnesite	TT of the wall in a house: 1.64 W/m ² K; The use of a composite board in the restauration in a house reduced TT (about 70%). Sample prepared from cattail leaves and magnesite could be used as interior insulation.

Gliścińska et al. (2019)	Panels	Hot pressing	AP, MeP, PhP	<i>BioF</i> : wood flakes, sawdust, ground cork, straw and flax fibres <i>Other filler</i> : chicken feather calamus <i>BI</i> : PLA	Thickness: 2.62-4.98 mm; Apparent D: 309.7-597.3 kg/m ³ ; E: 0.0886-1.280,3 GPa; EL: 0.7-1.6%; SA: 0.15-0.9; Frequency range within which the composite materials had the most suitable SA values: 460-6400 Hz. The different multilayer structures prepared from wood flakes, sawdust, cork, paper, straw, chicken feather calamus, flax fibres and PLA fibres as matrix showed similar values of thickness and apparent D. Composite made from flax fibres as reinforced showed higher TS than the material reinforced with particles. Composites made from wood flakes as reinforced showed the highest SA.
Guna et al. (2019)	Panels	Hot-pressing moulding	AP, HyP, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : raw bagasse <i>BI</i> : wheat gluten	Strength and modulus: 63% and 312 % higher than the gypsum; TS: 5.2 MPa (rind), 0.3 MPa (pith); TS: until 250 °C; WA: 62%; Heat transmission: a top surface temperature of 57 °C (after 20 min); SA: 0.3 (3500 Hz). Bagasse-gluten composites could replace commercial plasterboards because they showed similar D than gypsum and could improve other some properties. Agents such as flame retardant and sound absorbing materials could be added to samples to improve their performance replacing gypsum.
Hussain et al. (2019)	Panels	Moulding; Hot-pressing moulding	HyP, MeP, ThP	<i>BioF</i> : hemp shiv <i>BI</i> : starch and silica gel	MBV: 2.93-3.63 g/m ² RH; WA: 11.04-22.11 (kg/m ²), 98.02%-221.10%; TC: 0.052-0.057 W/mK; TD: 0.28-0.35 (10 ⁻⁶) m ² /s; SHC: 763.0-1050.28 J/kgK; BD: 175-240 kg/m ³ ; CS: 0.49-1.05 MPa. Samples manufactured from hemp shiv as aggregate and starch or silica gel as matrix showed excellent HyP, water permeability, TC, and MeP. These materials could be used as material to construction to improvement energy consumption.
Hussein et al. (2019)	Panels	Moulding, pressing, and hot-pressing	MeP, ThP	<i>BioF</i> : rice straw and flax shives <i>BI</i> : UF-resin and corn starch	D: 300-700 Kg/m ³ ; MOR: 0.30-13.85 MPa; MOE: 0.006-1.722 GPa; IB: 0.02-0.6 MPa; CS: 0.270-12.4 MPa; TC: 0.099 W/mK (flax shives) and 0.086 W/mK (rice straw). Samples prepared from flax shives showed higher MeP than those reported for samples made from rice straw. The higher BI content, the higher D and MeP, and the lower TC. UF-resin used as a BI showed better MeP than corn starch, but TC values were better for the latter.

Anexo 1: Tabla de revisión bibliográfica

Hýsek et al. (2019a)	Panels	Moulding	HyP, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : wheat husks <i>Other filler</i> : residues of soft PU foam <i>BI</i> : PU adhesive	D: 53.4-153.4 kg/m ³ ; IB: 2.3-31.1 kPa; CS: 1.4-18.3 kPa; Water uptake: 46.2%-132.4%; TC: 0.0418-0.0574 W/mK; VHC: 1.05x10 ⁵ -2.37x10 ⁵ (J/m ³ K). Samples obtained from soft PU foam residues and wheat husks showed excellent ThP. The higher wheat husks content, the higher TC.
Hýsek et al. (2019b)	Panels	Pressing moulding	HyP, MeP, PhP, ThP	Core: recycled softs PU and wheat husk (BIO) Layer: geopolymer (PU4349/3)	TC: 0.0427-0.0452 W/mK; HC: 0.108-0.126 MJ/m ³ K; D: 49.4-51.6 kg/m ³ ; IB: 0.64-1.06 kPa; Time to FIR: 500-800 s. The addition of wheat husk into the core of boards slightly increased TC and HC values. The panels prepared in this work could be used to make ThI building walls.
Iwaro y Mwashu (2019)	Structural elements	Block filling	Energy consumption, ThP	<i>BIO</i> : coconut fibre	TC: 0.054-0.134 W/mK; Energy consumption: for concrete blocks: 0.49 kWh without insulation (14-16 h), 0.45 kWh with fibreglass insulation (12-14 h) and 0.46 kWh with coconut fibre insulation (10-12 h) and for clay blocks: 0.70 kWh without insulation (12-14 h), 0.25 kWh with fibre glass insulation (12-16 h) and 0.42 kWh with coconut fibre insulation (12-14 h). Coconut fibre-based insulator can be used to achieve energy efficiency and thermal comfort. Coconut fibre can be considered as sustainable material for construction.
Jerman et al. (2019)	Raw materials	N/S	HyP, PhP, ThP	<i>BIO</i> : wood fibreboards, flax fibres, hemp fibres, jute fibres and sheep wool	BD: 23-54 kg/m ³ ; Open porosity: 96.33%-97.8%; Maximal MC: 14.0%-51.7%; WA: 0.14-0.52 kg.m ⁻² s ^{-0.5} ; Capillary MC: 94-238 kg.m ⁻³ ; TC: 0.0446-0.0545 W/mK; SHC: 1443-2130 J.kg ⁻¹ K ⁻¹ . Properties such as heat transport and moisture diffusivity of wood, flax fibre, hemp fibres, jute fibres and sheep wool were satisfactory enough for their potential use inside insulation systems.
Kamau-Devers et al. (2019)	Panels	Injection moulding	ChP, Environmental impact, HyP, ThP	<i>BioF</i> : wood flour <i>BI</i> : PLA	ST: 0.7%-4.4% (in-plane Radial), 2.9%-13.3% (out-of-plane); Differential scanning calorimetry; Crystallization temperature: 84.53-113.72 °C; Crystallization enthalpy: 30.64-40.41 J/g; Degree of crystallinity: 2.61%-16.42%; Melting temperature: 165.17-173.29 °C; Melting enthalpy: 40.13-55.78 J/g; TC: 0.2310-0.3577 W/mK; D: 1248-1274 Kg/m ³ . The increase of the wood fibre amount in the composite and the moisture exposure increases

					the TC. The composites made from wood flour and PLA could improve the environmental impact.
Kang et al. (2019a)	Raw materials	N/S	AP	<i>BIO</i> : rice hull	SA: 0.53-0.999; SRI: 4.26 (100-500 Hz)-38.95 (1000-6400 Hz) dB. The higher D and thickness, the higher SA. Rice hull mats could be used as satisfactory SIN materials due its good SA.
Kang et al. (2019b)	Panels	Hot-pressing moulding	AP	<i>BioF</i> : mandarin peel and sawdust of radiata pine <i>BI</i> : UF-resin	Reverberation room method: Reverberation time: 4.04-23.03 s, 2.84-7.20 s, 1.77-3.69 s to low, medium and high frequencies. SA coefficient: below 0.3 to 400 Hz range and 0.4 in the range of 500 Hz. Transfer function method: SA rates: 62% to 2-3 kHz and 66% to >3kHz; NRC: 0.33. Boards prepared from mandarin peel and sawdust can be used as SA materials SA measured by the transfer function method was about 10% lower than that obtained through the reverberation room method. It was recommended to measure SA with the transfer function method because it was needing less consumption of specimens and the measurement was quick.
Karaky et al. (2019)	Panels	Pressing moulding and freezing	AP, HyP, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : sugar beet pulp <i>BI</i> : potato starch	BD: 271.44-360.04 kg/m ³ ; AD: 1222.18-1293.42 kg/m ³ ; Porosity: 77.8%-72.1%; SA: 60% to frequencies < 500 Hz and 50% to frequencies > 500 Hz; CS: 0.40-0.63 MPa; TS: 0.11-0.21 MPa; MOE: 0.00206-0.00317 GPa; Moisture: 2.6-2.8 g/(%RH.m ²); TC: 0.695-0.0757 W/(mK). The higher potato starch content, the higher BD, MOE and MC. The composite with a 40 wt.% of potato starch showed optimal HyP. Composite with a 10 wt.% of potato starch showed optimal results for AP.
Kremensas et al. (2019)	Panels	Pressing moulding	HyP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : hemp shivs <i>BI</i> : corn starch	BD: 81-96 kg/m ³ ; TC: 0.0505-0.0616 W/mK; Microstructural: shape of vessels similar to an eclipse and square shaped; D: 319-439 kg/m ³ ; Short-term WA: 4.92-5.72 kg/m ² ; ST: 10.7%-27.8%. TC and WA values reported for hemp shivs-based samples were related to particle size and microstructure. Samples obtained from shredded hemp shivs showed the lowest TC, ST and WA values. While composites with non-shredded showed the highest TC, ST and WA values. The addition of starch as BI led to the lowest TC values.

Anexo 1: Tabla de revisión bibliográfica

Li et al. (2019)	Panels	Pressing moulding	HyP, MeP, ThP	<i>BioF</i> : recycled wood fibres <i>Other filler</i> : waterglass <i>BI</i> : cement	E: 1820 MPa; MOR: 2.5 MPa; CS: 5.3 MPa; SHC of dry material: 870 J/kgK; TT: 15 W/m ² K. Composites made from recycled wood fibres and a cementitious matrix showed a good MBV that proved its potential for regulating the indoor humidity.
Liu et al. (2019)	Panels	Moulding	HyP, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : wheat straw <i>BI</i> : metakaolin with Hydrogen peroxide <i>Activator</i> : alkali	TC: 0.092-0.186 W/mK; CS: 0.18-5.622 MPa; D: 235-894.1 kg/m ³ ; WA: 32%-107%; MAB: 4%-33%. The optimal bio-insulation material exhibited very low amount of wheat straw with the smallest particle size and contained an intermediate amount of hydrogen peroxide. This sample was the optimum because it reached the lowest TC, intermediate CS, and low D values.
Luthra et al. (2019)	Panels	Moulding at injection pressure	ChP, HyP, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : banana peel (treated and untreated) <i>BI</i> : PP	Morphology: holes and gap; TS: 22.2-33.5 MPa; E: 0.815-2.106 GPa; EL: 1.9%-9.9%; MOR: 36.0-47.4 MPa; MOE: 1.125-2.256 GPa; IST: 1832 J/m; HDT: 94-137 °C; Onset degradation temperature: 225-440 °C; Peak degradation temperature: 275-454 °C; Char of residue: 0.31%-11.2%. The higher banana peel content, the higher WA. Banana peel fibres performed successfully as reinforcement for PP, as they significantly increased MeP, TStb, HDT and WA of the obtained composites.
Mahieu et al. (2019)	Panels	Hot-pressing moulding	ChP, HyP, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : flax shives and sunflower bark <i>BI</i> : UF-resin	BD: 100 kg/m ³ , 180 kg/m ³ ; MOR: 0.5-1 MPa, Maximum: 3.1 MPa, 3.8 MPa; MOE: 50-100 MPa, Maximum: 500 MPa, 315 MPa; WA: 170%-270%; ST: 65-93% (without BI) and 15%-47% (with BI); Resistance to fire: damaged area remains below the 15 cm established by the standards; TC: 0.042-0.077 W/mK. Flax shives and sunflower could be used as an alternative for the manufacture of wooden boards. Samples prepared in this work could be more competitive than wood-based particleboards because of their appropriate ThP.
Mishra y Nath (2019)	Panels	Pressing moulding	AP, Dielectric properties, Electrical conductivity, PhP, ThP	<i>BioF</i> : sugarcane <i>BI</i> : epoxy resin	Microstructure: numerous pores; SA: 0.80-0.85, SA increased with the frequency from 500 to 3000 Hz, maximum values obtained at 2500-3000 Hz. The higher sugarcane content, the lower TC. Composite made from sugarcane and epoxy resin showed excellent sound, ThI and electrical insulation. Pores on

Anexo 1: Tabla de revisión bibliográfica

					samples surface favoured the reduction of TC and electric conductivity and reinforced the sound performance.
Mohammad et al. (2019)	Particulate samples	Pressing moulding	AP	<i>BIO</i> : date palm fibre and coconut fibre	SA: 0.0415-0.8645; NRC: 0.2-0.6. The higher thickness, the higher SA. Composite with a thickness of 50 mm and a 75 wt.% of date palm fibre showed the highest NRC. Composites made from date palm fibre and coconut fibre could be used as SA material.
Muñoz et al. (2019)	Structural elements	Hot-pressing moulding	Environmental Impact, HyP, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : chips from pruned grapevine shoots <i>BI</i> : fire clay brick	BD decreased up to 25% for 10% of replacement. WA increased from 17%-31% for 10% of replacement. An increase in temperature led to a decrease in the more open porosity. TGA: exothermic peaks between 250-650 °C. The addition of chips from pruned grapevine shoots into fire clay bricks reduced their TC and CS and increased their WA. TC values reported for fire clay bricks were affected by chips particle sizes selected. Samples having a limit of 10 wt.% of chips were selected to maintain CS under standards values (above 5 MPa), and the optimum particle size was established in 1.5 mm to reduce the impact of additive pre-treatments.
Muthuraj et al. (2019)	Panels	Hot-pressing moulding	PhP; ThP; MeP; HyP	<i>BioF</i> : rice husk, wheat husk and wood fibres <i>Other filler</i> : textile waste <i>BI</i> : poly butylene adipate-co-terephthalate (PBAT) and PLA	D: 378-488 kg/m ³ ; TC: 0.08-0.14 W/mK; TEF: 194-249 W s ^{1/2} /m ² /K; SHC: 524-844 J/kgK; MOR: 0.8-2.26 MPa; MOE: 0.061-0.136 GPa; CS: 10-40 MPa; Highest CM: 730 MPa; Melting curve: 150-160 °C; TGA: good TStb < 250 °C; WA (24 h): 43%-63%. Composites prepared from rice husk, wheat husk, wood fibres and textile waste with poly butylene adipate-co-terephthalate (PBAT) and PLA as BI showed excellent results and could be used as ThI materials in buildings. Rice husk-based composites showed the lowest TC and WA values.
Němec et al. (2019)	Panels	N/S	AP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : wood wool <i>BI</i> : cement, EPS	TC: 0.032-0.135 W/mK; TD: 3.32-6.78 (x10 ⁷) m ² /s; SHC: 820.7 J/kg/K. Maximum SA: 0.93 (wood wool with cement), 0.89 (wood wool with EPS). The increase of the samples thickness moved the peak value of the SA to lower frequencies. The samples made from EPS showed lower TC than samples made from cement.

Anexo 1: Tabla de revisión bibliográfica

Park et al. (2019)	Panels	Moulding	HyP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : wood particles <i>BI</i> : lime, cement	D: 660-984.31 kg/m ³ ; TC: 0.0742-0.1500 W/mK; Water vapor resistance factor: 125-1868; Free water saturation: 1252, 1328.8 kg/m ³ ; Maximum water saturation: 1327.3, 1394.2 kg/m ³ ; Porosity: 1.3250, 1.3960; Saturation coefficient: 0.9425, 0.9554. The samples made from bigger size of wood particles showed higher ThI.
Pásztor et al. (2019)	Panels	Hot pressing moulding	HyP, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : bark from debarking polar logs <i>BI</i> : UF-resin <i>Catalyst</i> : ammonium sulphate ((NH ₄) ₂ SO ₄)	BD: 259.02-387.57 kg/m ³ ; WA: 182.47%-244.10%; ST: 7.27%-8.39%; TC: 0.059-0.079W/mK; MOR: 0.11-1.42 MPa; MOE: 0.0768-0.2356 GPa; IB: 0.08-0.11MPa. Optimum BD of panels made from bark of poplar logs and UF-resin was about 350 kg/m ³ . This optimum BD sample showed the best MeP and the lowest WA and ST values. TC was highest to this sample, but it was still low to guaranteed good ThI.
Pavelek y Adamová (2019)	Panels	Mounted and filled	PhP; HyP; ThP	Structure: medium D particleboard Core: rapeseed and woodchips (BIO)	MC: 6.9%-8.1%; TT: 0.208-0.404 W/m ² K; R-value: 2.475-4.207 m ² K/W; TC: 0.040-0.065 W/mK; BD: 110 (rapeseed), 205 (woodchips) kg/m ³ . Sandwich panels prepared from medium D particleboard filled with rapeseed and woodchips showed appropriate ThP which were like those reported when using mineral wool. The samples could allow manufacturers to design complicated structures filled with ThI materials.
Prabhakaran et al. (2019)	Panels	Moulding	AP, PhP	External layer: flax (BIO), glass Core: cork <i>BI</i> : epoxy resin	SA: composite with flax showed up to 45-96% higher values than glass and around 13-47% higher values than glass-flax; Maximum SA: 0.53. Sandwich samples made from flax as skin and cork as core showed the highest SA and damping ratio values. But the IST of these materials should be improved.
Robert et al. (2019)	Panels	Pressing moulding	HyP, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : coconut husk <i>Other filler</i> : newspaper paste <i>BI</i> : starch slurry	BD: 333.33-375.001 kg/m ³ ; SHC: 1452.401-2190.614 J/kgK; TC: 0.058-0.086 W/mK; TR: 11.628-17.241 mK/W; TD: 0.73-1.41 (10 ⁻⁷) m ² /s; WA: 23.512%-27.711%; MOR: 0.435-0.538 MPa; CS: 0.321-0.439 MPa. The composites made from newspaper and coconut husk could be used as ThI in construction.
Rojas et al. (2019)	Panels	Pulping method	ChP, Energy consumptio	<i>BioF</i> : wheat straw and corn husk <i>BI</i> : Sodium hydroxide (NaOH)	TStb: until 250 °C; Size of porous structure: 10 µm, 50 µm; TC: 0.046 W/mK, 0.047 W/mK; D: 104.84-112.50 kg/m ³ , 79-128.17 kg/m ³ ; Moisture: 7.54%, 7.65%; Flexural test: 0.15 MPa, 0.80

			n, Energy inventory, MeP, PhP, ThP		MPa; Compression measurements: maximum 0.057 MPa, 0.024 MPa. Wheat straw and corn husk could be used for the preparation of ThI materials because their low TC values which were similar to those reported for some EPS- based ThI materials. Composite made from wheat straw and corn husk could also improve energy efficiency and thermal comfort of buildings. It was estimated that energy used during the manufacture of natural materials would be recovered in just 2 or 2.5 years.
Sabapathy y Gedupudi (2019)	Raw materials	N/S	ThP	BIO: straw rice	TC values increased approximately 1.5 (perpendicular) and 2.5 (parallel) times when samples were conditioned to 80% RH; TC: Parallel orientation: 0.069-0.194 W/mK and Random and perpendicular orientation: 0.040-0.084 W/mK; TD: 0.24×10^{-6} - 1.53×10^{-6} m ² s ⁻¹ . Random and perpendicular fibres showed better insulating properties than parallel fibres. ThP ranged quite low for the different types of straw, but properties should be analysed under different conditions (e.g., RH).
Sair et al. (2019)	Panels	Hot-pressing moulding	AP, ChP, HyP, MeP, PhP, ThP	BioF: Stipa tenacissima L. BI: polyol with hydroxyl number of 0.91 and a 4.4-diphenylmethane diisocyanate	Crystallinity index: 64.26-72.29; Degree of crystallinity: 0.5213-0.6217; TGA: alkali treatment increased TStb; WA: the highest values obtained by composite having 5 wt.% of untreated alfa fibres, composites with alkali treated fibres exhibited lower WA values; E: 2.7-4 GPa; TC: 0.031-0.044 W/mK; SA: 0.05-0.35. The higher alfa fibre content, the higher SA. Composites prepared with alkaline treated alfa fibres showed an improvement in crystallinity indices, WA, MeP and interfacial properties, but TC values were increased. The higher fibre content, the higher SA. The optimum fibre alkali content was 20 wt. Materials prepared in this work could be used for ThI and SIN purposes in construction.
Salas-Ruiz y Barbero-Barrera (2019)	Panels	Low pressing moulding	HyP, MeP, PhP, ThP	BioF: pulp and staple particles of water hyacinth BI: cement	P-panels: BD: 620.35-314.57 kg/m ³ ; MC: 1.95-8.63wt%; ST: 77%; MOR: maximum 0.61 MPa (80:20) and minimum 0.23 MPa (40:60); TC: 0.0620-0.0870 W/mK. S-panels: BD: 244.65 kg/m ³ ; MC: 2.26-12.0 wt.%; ST: 75%; MOR: maximum 0.61 MPa (80:20)

					and minimum 0.23 MPa (40:60); TC: 0.045-0.067 W/mK. The higher porosity, the lower TC. The higher particle size, the lower TC, D and MeP, and the higher WA. Water hyacinth particles-cement boards could be used as alternative to ThI material.
Salas-Ruiz et al. (2019)	Particulate samples	Low pressing moulding	HyP, MeP, PhP, ThP	BIO: petioles of water hyacinth	Pulp: BD: 305550 Kg/m ³ ; MC: 8.63%; WA: 555.20%; ST: 57.68%; MOR: 0.548 MPa; TC: 0.065 W/mK. Staple: BD: 251230 K g/m ³ ; MC: 11.84%; WA: 450.51%; ST: 101.05%; MOR: 0.215 MPa; TC: 0.047W/mK. Water hyacinth petioles-based particleboards could be manufactured without BI and thermal energy processes. The internal structure of the water hyacinth petioles originated samples with excellent ThP. The particle size of the water hyacinth petioles influences the properties of the particleboard.
Santoni et al. (2019)	Raw materials	Carding; Alkaline treatment; Wide tooth; Fine tooth combing	AP, PhP	BIO: hemp fibres (Cannabis Sativa)	Internal porosity: 0.93; FR: 5536 Pas/m ² , 4920 Pas/m ² ; 7883 Pas/m ² , 12503 Pas/m ² ; Normal incidence SA: 1.05. Treatments applied to samples improved their AP. A very good approximation of the SA coefficients has been achieved thanks to the Johnson-Champoux-Allard model.
Taban et al. (2019)	Panels	Pressing moulding	AP, PhP	BioF: date palm empty fruit fibres BI: PVA	BD: 100 and 200 kg/m ³ ; FR: 1535-5910 N m ⁻⁴ s; Porosity: 78.49%-90.58%; Tortuosity: 1.00-3.8; SA: 0.6-0.8 above 1.5 kHz (20 and 30 mm of thickness) and about 0.9 (40 mm of thickness); the Delaney-Bazley and Nelder-Mead methods successfully modelled the values of SA; The Johnson-Champoux_Allard model was not very accurate to predict data at frequencies above 2.5 kHz. Date palm empty fruit fibres showed values of SA similar to those obtained with other natural fibres. SA was adequately predicted by a mathematical model which used the optimized Delaney-Bazley model with Nelder-Mead simple method.
Tiuc et al. (2019)	Panels	Moulding	AP, MeP, PhP, ThP	BioF: particles of spruce sawdust and beech sawdust BI: PU foam (Neukadur PU 131)	The lowest TC: 0.039-0.041 W/mK; TC of the material with the lowest BI percentage and the lowest D and thickness: 0.165 W/mK; SA: Fir sawdust: >0.65 to 500-6300 Hz (30%, 40 mm), >

					0.5 to 2000-8000 Hz (30%, 20 mm) and Beech sawdust: >0.6 to 400-5000 Hz (30%, 40 mm). The higher PU amount in sawdust-based composite, the higher sample's tensile, bending and compression, but the lower MOE. The higher thickness, particle size and BI content, the higher SA at low frequencies. Thinner samples included in sandwich panel voids could improve the SA of sandwich panels.
Tsalagkas et al. (2019)	Panels	Hot-pressing moulding	HyP, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : poplar bark slabs <i>Other filler</i> : fibre glass, paper sheets <i>BI</i> : UF-resin	TC: 0.067-0.074 W/mK; D: 336.80-413.07 kg/m ³ ; ST: 9.63%-18.18%; MOR: 0.54-4.45 MPa; MOE: 0.28-2.86 GPa; WA (24 h): 1wt.%-218.37 wt.%; Equilibrium MC: 7.29%-9.12%. Panels made from poplar bark slabs, and fibre glass and paper sheets showed intermediate thermal performance and could be used for ThI, however their WA, fire and durability would have to be evaluated.
Usubharatana y Phungrassami (2019)	Panels	Hot-pressing	HyP, Life cycle impact, PhP, ThP	<i>BioF</i> .: rice straw, bagasse, coconut coir, oil palm fibre <i>BI</i> : latex	D: 44.08-361.44 kg/m ³ ; TC: 0.042-0.087 W/mK; WA: 73%-535%; ST: 0.51%-11.10%; FIR: 51.5-362.1 mm/min; Global warming potential: 17.8-110.0 kgCO ₂ eq/f.u. Insulation materials prepared from rice straw, bagasse, coconut coir or oil palm fibre showed TC values lower than commercial ThI such as rock wool and fibre glass. Insulation materials made from oil palm fibre and latex-chemical mixture showed the least environmental impacts.
Viel et al. (2019a)	Panels	Pressing moulding	HyP, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : hemp shiv and corn cob residues <i>BI</i> : black liquor (from paper industry), molasses (from sugar industry), commercial lignin (from wood industry), PLA	D: 167.0-556.9 kg/m ³ ; Skeleton D: 1124.6-1310.0 kg/m ³ ; Total porosity: 60.0%-87.5%; CS: 227.5-695.7 kPa; TC: 0.0675-0.1716 W/mK; MBV: 1.84-5.19 g/m ² %RH. It was possible to develop composites made entirely from BIO. Composites made from hemp shiv and corn cob residues showed adequate CS values to be used as self-bearing materials. Composites made from hemp shiv showed lower CS values than those obtained for materials made from corn cob.
Viel et al. (2019b)	Panels	Hot-pressing moulding	ChP, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : hemp shiv <i>BI</i> : wheat straw	D: 153.9-188.0 kg/m ³ ; CS: 0.26072-0.33907 MPa; TC: 0.0668-0.0759 W/mK. The lower BD, the lower TC. To improve ThP, it

Anexo 1: Tabla de revisión bibliográfica

					was necessary to reduce the D by reducing compaction during composite preparation.
Wimmers et al. (2019)	Panels	Moulding	HyP, The best fungi/host combinations and their optimal growing conditions, ThP	<i>BioF</i> : birch, aspen, spruce, pine, fir <i>BI</i> : red belted conk, rusty gill polypore, chicken-of-the-woods, dyer's conk, birch conk, oyster mushroom, spring polypore, pubescent Trametes, fragrant bracket fungus, violet-pored bracket	MC: 45%, 65%; TC: 0.051-0.055 W/mK. Best fungal growth was showed with birch sawdust. Spring polypore and fragrant bracket showed the fastest, the densest, and the most reliable growth. TC values were about 30% higher than traditional foam insulation products.
Yu et al. (2019)	Panels	Hot moulding	MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : bagasse <i>BI</i> : soy oil-based polyol, petroleum-based polyol and polymeric MDI-resin	Cell size: 234.59-287.06 μm ; D: 57.64-64.15 kg/m ³ ; CS: 237.4-246.7 kPa; TC: 0.03646-0.03772 W/mK; Weight loss: 26.20%-31.21%; TGA: the addition of bagasse does not change the degradation process and the TStb of samples. Biodegradable composites based on bagasse and soy oil were difficult to degrade naturally. The higher bagasse content, the higher D and CS, and the lower TC. Bests values of TC were found in composites with 10 wt.% of bagasse. Biodegradable composites could be used as ThI materials.
Zhang et al. (2019)	Panels	Hot pressing moulding	AP, ChP, MeP	<i>BioF</i> : natural fibres (bamboo, cotton, and flax) <i>BI</i> : PLA	Vibrational damping: frequencies 96-1299 Hz; Coincidence frequency: 1625-2448 Hz; Damping ratio: maximum 0.97. Composites made from bamboo, cotton, and flax as aggregate and PLA showed low environmental impact. Composite made from bamboo and PLA showed the highest bending stiffness. Composite made from cotton and PLA showed high impact toughness. Samples prepared in this work could be used as SA materials and replace synthetic composites. Composite prepared from cotton, bamboo and PLA showed the best AP.
Ahmadi et al. (2020)	Structural elements	Filling-plastering-mounting	PhP, ThP	<i>BioF</i> : wheat straw <i>Other filler</i> : PS, sand <i>Structure</i> : clay hollow bricks <i>BI</i> : cement	HF: 2.722-8.856 W/m ² ; TT: 0.43-2.07 W/m ² K (U-value), 0.48-2.32 m ² K/W (R-value). Wheat straw could be used as filler in hollow bricks for insulation buildings. The higher wheat straw compaction, the higher ThP.

Anexo 1: Tabla de revisión bibliográfica

Alabduljabbar et al. (2020)	Panels	Moulding	AP, HyP, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : sawdust <i>BI</i> : fly ash, granulated blast furnace slag <i>Other</i> : sodium hydroxide, sodium silicate	D: 807.39-2068.38 kg/m ³ ; CS: 48.6-65.8 MPa; MOR: 4.9-6.8 MPa; Splitting TS: 3.0-4.2 MPa; WA: 9.7%-16.9%; SA: 0.032-0.673; NRC: 0.124-0.237; TC: 0.09-0.39 W/mK. The higher sawdust content, the lower TC, and the higher SA. The lightweight concrete with high sawdust content showed the best ThP and AP.
Ali et al. (2020)	Panels	Pressing moulding	ChP, HyP, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : agave and wheat straw <i>BI</i> : pure corn starch powder	D: 78-267 kg/m ³ ; TGA: fibre stables up to about 184 °C, where the fibre loses 3% of its mass. At 329.8 °C the fibre loss the 50% of its mass. Char formation started at about 992 °C (loss 81.5% of its mass); TC: 0.043592-0.05321 W/mK; MOE: 1.14-44.76 MPa; MOR: 0.2567-5.379 MPa; Flexural strain at MOR: 0.20-0.43; MC: 3.0%-6.5%. Both loose agave and wheat straw fibres and hybrid panels could be used as insulation material due to their low TC values. The higher straw content, the lower TC. When agave fibre was added to wheat straw fibres and corn starch, MOR and MOE values were increased. Both fibres absorb very low moisture.
Arenas et al. (2020)	Particulate samples	Pressing moulding	AP, PhP	<i>BIO</i> : esparto grass fibres	D: 101.2-173.0 kg/m ³ ; AFR: 1.49-5.40 kPa s/m ² ; Best-fitting SA coefficients: 0.0190-1.0452. Esparto grass fibres was similar to a bulk fibrous sound-absorbing material. The higher frequency and material thickness, the higher SA.
Benaniba et al. (2020)	Panels	Moulding	HyP, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : date palm fibres <i>Other fillers</i> : sand <i>BI</i> : cement	D: 790-1895 kg/m ³ . The WA depended on the open porosity of the material. The increase of fibre content increased the WA. The higher fibre content, the lower TC and MeP. Minimum TC: 0.15 W/mK.
Borrell et al. (2020)	Panels	Moulding	AP	<i>BioF</i> : fruit stones (olive, cherry, apricot, peach) <i>BI</i> : Cyanoacrylate adhesive to glue fruit stone <i>Other</i> : Bio-resin to fills the pores	SA: 0.17-0.38 (olive), 0.21-0.42 (cherry), 0.17-0.36 (apricot); 0.13-0.39 (peach); Low frequency absorption coefficient: 0.12-0.57 (olive), 0.15-0.61 (cherry), 0.12-0.62 (apricot), 0.11-0.51 (peach); Maximum SA: 0.76 at 725 Hz (olives), 0.88 at 796 Hz (cherry), 0.94 at 1000 Hz (apricot), 0.74 at 1610 Hz (peach). Samples of fruit stones exhibited adequate SA values at low frequencies. SA values clearly depended on the shape and size of the fruit

					stones. Fruit stones were an adequate solution to SIN in construction.
Bossa et al. (2020)	Panels	Moulding	ChP, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : walnut shell <i>Other filler</i> : cellulose powder <i>BI</i> : PU Other: diatomite	Microstructure: cell diameters from 70 to 350 µm; TGA: first degradation at 150-220 °C with a weight loss of 6%; TC: 0.027-0.031W/mK; E: 3.431-9.996 MPa; D: 86.17-11.53 kg/m³. Nanocomposites with walnut shell and cellulose powder showed the best TStb and MeP, hence, could be used as sustainable ThI in building applications.
Casas-Ledón et al. (2020)	Panels	Low-pressure steam injection process	Life cycle impacts, ThP	<i>BIO</i> : Eucalyptusbark fibres <i>Other</i> : biofibres-PE and PP flame retardant Antifungal	TC: 0.045-0.049 W/mK. Panel with the lowest D showed the best environmental impact and ThP. Eucalyptus bark fibres could be used in the manufacture of ThI panels for construction.
Čulik et al. (2020)	Panels	N/S	AP	<i>BioF</i> : wood (beech, poplar) <i>BI</i> : UF, MUF-resin	D: 461-1163 kg/m³; SA: 0.00-0.53; NRC: 0.10-0.30. The NRC value showed that the composite made from wood could be included among absorptive materials.
De Carvalho et al. (2020)	Panels	Pressing moulding	AP, MeP	<i>BioF</i> : sunflower stalks <i>BI</i> : gypsum Other: potassium benzoate	SA: 0.44-0.91; MOR: 0.608-0.769 MPa. The composite made from sunflower stalks, gypsum and potassium benzoate showed good AP, but improvement processes would be necessary regarding modelling particle alignment for to give better AP.
Delhomme et al. (2020)	Panels	Moulding	AP, HyP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : hemp <i>BI</i> : concrete	BD: 97.0-118.8 kg/m³; MC (1 min immersion): 158.3%-190.3%; MC (48 h immersion): 354.4%-387.8%; Diffusion rate of water: 47.4-64.3; Max SA: 0.86-0.99; TC: 0.064-0.115 W/mK. Hemp could be an efficient BIO to improve AP and ThP.
Diéye et al. (2020)	Panels	Moulding	MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : typha leaf <i>BI</i> : gum arabic, starch of corn	D: 387-500 kg/m³; CS: 0.44-1.05 MPa; TC: 0.051-0.083 W/mK; TEF: 168.7-216.2J/m²Cs ^{1/2} ; Panels 100% plant-based could be used as ThI in construction.
Ferrandez-García et al. (2020a)	Panels	Hot-pressing moulding	HyP, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : Washingtonia palm leaf rachis particles <i>BI</i> : citric acid monohydrate	D: 687.10-812.20 kg/m³; ST (2 h): 16.40%-48.60%; ST (24 h): 19.60%-94.10%; WA (2 h): 56.10%-99.30%; WA (24 h): 72.20%-127.50%; MOR: 2.77-12.5 MPa; MOE: 445-2640 MPa; IB: 0.14-0.60 MPa; TC: 0.079-0.089 W/mK. The smaller particle sizes, the stronger panels, while the larger particle sizes, better ThP.

Anexo 1: Tabla de revisión bibliográfica

Ferrandez-García et al. (2020b)	Panels	Hot-pressing moulding	AP, HyP, MeP, PhP	<i>BioF</i> : giant reed particles <i>BI</i> : UF-resin <i>Hardener</i> : ammonium nitrate	D: 719.6-817.8 kg/m ³ ; MOR: 10.5-17.2 MPa; MOE: 1190-2200 MPa; IB: 1.0-1.3 MPa; ST (2 h): 13%-15.8%; ST (24 h): 19.3%-20.7%; SA: 0.03-0.39. The higher particle size, the lower D, and the higher SA. The particleboards made from small amounts of cement showed good MeP and TC. The particle boards could be used in the manufacture of furniture, interior décor and enclosures in building.
Ferrandez-Villena et al. (2020a)	Panels	Hot-pressing moulding	HyP, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : vine shoot pruning <i>BI</i> : UF <i>Hardener</i> : ammonium nitrate	D: 782.94-965.06 kg/m ³ ; ST (2 h): 15.4%-22%; ST (24 h): 26%-31.6%; WA (2 h): 37.3%-52.8%; WA (24 h): 60.8%-82.2%; TC: 0.0642-0.0676 W/mK; R-value: 0.1036-0.1090 m ² K/W; MOR: 6.58-16.5 MPa; MOE: 743-1810 MPa; IB: 1.22-1.92 MPa. High pressure and small particle size showed the best MeP. The particleboards gave the minimum requirements for medium-D particle boards and they showed good TC.
Ferrandez-Villena et al. (2020b)	Panels	Hot-pressing moulding	HyP, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : Canary Islands palm <i>BI</i> : cement <i>Plasticier</i> : potato starch	D: 1039-1083 kg/m ³ ; ST (2h): 14%; ST (24 h): 25.2%-30.2%; WA (2 h): 32%; WA (24 h): 56%; IB: 0.58-0.80 MPa; MOR: 13.6-15.2 MPa; MOE: 1766.2-1792.6 MPa; TC: 0.054 W/mK.
Fu et al. (2020)	Structural elements	Mounting	HyP, ThP	Layers: Oriented strand board Spruce-pine fir (BIO) Glass insulation cotton Waterproofing membrane Cork board (BIO) Anticorrosion pine plate	TC of layers: 0.034-0.177 W/mK; SHC of layers: 800-2500 J/kgK; Absolute R-value: 0.011-2.618 K/W; MAB of layers in different RH: 0.11-748.19 kg/m ³ ; TT: 0.256-0.516 W/m ² K (measured) and 0.256-0.529 W/m ² K (simulated). The higher RH, the higher MC. WUFI simulation method could predict thermal behaviour with a maximum absolute error of 4%. Walls with cork board as layer exhibited better ThP than walls with anti-corrosion pine plate as layer.
Gaujena et al. (2020)	Panels	Hot-pressing	HyP, ThP	<i>BioF</i> : hemp fibre <i>BI</i> : PF-resin, Carbamide-formaldehyde resin	ST: 4.35%-5.28%; TC: 0.0544-0.0655 W/mK. Composites could be used as sustainable building material with low environmental impact to ThI. A disadvantage of composites was the high WA.
Gomez et al. (2020a)	Panels	Pressing	AP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : fique fibres <i>BI</i> : natural rubber latex	Fibre D: 647.9 kg/m ³ ; BD: 197.4 kg/m ³ ; Porosity: 80.7%; FR: 6178.8-6433.84 Rayls/m; TC: 0.0434 W/m. Fique fibres showed a good SA. Fique could be a potential renewable insulation material.

Anexo 1: Tabla de revisión bibliográfica

Gomez et al. (2020b)	Panels	Moulding	AP, ChP, HyP, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : coir and fique fibres <i>BI</i> : natural rubber latex	D: 600 kg/m ³ (fique), 800 kg/m ³ (coir); TS: 120.8 MPa (coir), 194.8 MPa (fique); MOE: 1.8 GPa (coir), 4 GPa (fique); BD: 123.1-151.7 kg/m ³ ; Max WA: 560.5%-653.8%; Max WA draining excess fluid: 252.7%-334.1%; ST: 6.7%-13.5%; MOR: 0.020-0.080 MPa. Peak SA showed around 1500 Hz. Coir boards showed better S than its counterpart from 250 to 800 Hz. The panels could be a promising alternative to traditional absorbents.
Gounni y Louahlia (2020)	Particulate samples	Moulding	Energy performance, PhP, ThP	<i>BIO</i> : cob <i>Other</i> : sand	D: 625-1145 kg/m ³ ; TC: 0.19-0.24 W/mK; TD: 0.13-0.19 mm ² /s. The addition of cob in building material showed better ThP conditions compared to the conventional house.
Guna et al. (2020)	Panels	Hot-pressing moulding	AP, HyP, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : rice husk and groundnut shell <i>BI</i> : PP	Theoretical D: 625-1140 Kg/m ³ ; Experimental D: 565-1080 Kg/m ³ ; TS: 9.6-15.6 MPa; Modulus of tensile: 6.4-32.9 GPa; MOR: 7.16-37.6 MPa; MOE: 4.7-20.2 GPa; TC: 0.156-0.270 W/mK; SA: 0.11-0.48; WA: 9%-24%. Biocomposites made from rice husk and groundnut shell with PP as BI exhibited high potential to be used in false roofing. TC values depended on the rice husk content, thus TC increased as the content raised. SA of samples at high frequencies was comparable to those reported for gypsum ceiling tiles. WA of rice husk based KGG/biocomposites were lower than that reported for a gypsum board.
Hassan et al. (2020)	Panels	Moulding	AP, MeP, ThP	<i>BioF</i> : coconut husk, sugarcane (treated) <i>Other filler</i> : cotton fly <i>BI</i> : epoxy resin	SA: 0.059-0.183; IST: 3.25-9.73 KJ/m ² ; MOR: 16.6-81.7 MPa; TC: 0.303-0.421 W/mK; TD: 0.265-0.287 (10 ⁻⁶ m ² /s); R-value: 0.0071-0.0120 Km ² /W. The composites could be used in construction, indoor panels and automotive body parts with SIN.
Hellová et al. (2020)	Raw materials	N/S	HyP, ThP	<i>BioF</i> : flax fibres, hemp <i>BI</i> : BiCo fibres <i>Other</i> : soda	MC: 0.05%-17.05%; TC: 0.039-0.086 W/m. The composites materials showed a MC higher than PS or mineral wool. The higher MC, the higher TC.
Iannace et al. (2020)	Raw materials	N/S	AP	<i>BIO</i> : cork	SA: 0.13-0.45. The cork improved the AP.
Intaboot (2020)	Panels	Pressing moulding	AP, HyP, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : rice straw <i>Other fillers</i> : soil, sand, rice husk ash <i>BI</i> : cement	CS: 2.85-5.79 MPa; WA: 16.09%-20.14%; Porosity: 26.40%-29.30%; TC: 0.16-0.23; Maximum SA: 0.763 at 2000 Hz; NRC: 0.175-0.356. The higher rice straw content, the lower TC. SA

Anexo 1: Tabla de revisión bibliográfica

					decreased at low frequencies and increased at high frequencies with increasing the rice straw content.
Ismail et al. (2020)	Panels	Moulding	MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : wheat straw <i>BI</i> : Tradical, Tradical thermo, plaster <i>Additives</i> : hemoglobin, casein, gelatin	TC: 0.054-0.069 W/mK; E: 1.22-11.82 MPa; Deformations: 0.0014-0.0097. The addition of 5% of hemoglobin to the plaster reduced the TC. The composites could be used as ThI in construction.
Iswanto et al. (2020)	Panels	Hot-pressing	AP, HyP, MeP	<i>BioF</i> : bamboo strand, sugar palm fibre, cornstalk and sugarcane bagasse <i>BI</i> : isocyanate resin	D of particleboard: 750 Kg/m ³ ; MC: 6.0%-7.29%; ST: 8.29%-22.94%; MOE: 2.404-4.30313 GPa; MOR: 14.94-43.15 MPa; IB: 0.03-0.40 MPa; SA: 0.3-0.9. The cornstalk used as core layer improved the dimensional stabilization due its low value of ST. Samples made from sugar palm fibres, cornstalk, sugarcane bagasse, bamboo strands as reinforcement and isocyanate resin as BI were an effective SIN because their minimum SA values were higher than 0.15.
Jamaluddin et al. (2020)	Panels	Moulding	AP, HyP, MeP, PhP, ThP	<i>BIO layer</i> : luffa fibres <i>Other layers</i> : PU, glass wool	EL: 11.06%-32.33%; TS: 0.16-0.96 MPa; MOE: 0.96-12.7 MPa; WA: 22.05%-118.71%; Sound passed: 78.7-70.03 dB; Sound absorbed: 9.97-20.77 dB; SA: 0.11-0.27. The higher glass fibre content, the higher TS and MOE. The sandwich composites could be used as heat and SIN materials.
Kain et al. (2020)	Panels	Hot pressing	HyP, MeP, ThP	<i>BioF</i> : larch, pine, spruce, fir, oak tree bark <i>BI</i> : UF-resin, MUF-resin, Quebracho, Mimosa <i>Additives</i> : NaOH <i>Hardener</i> : hexamethylenetetramine	IB: 0.03-0.36 MPa; MOR: 0.12-2.76 MPa; MOE: 30-484 MPa; ST: 0.05-0.29 (mm/mm); WA: 0.25%-0.86%; TC: 0.05949-0.08868 W/mK. The panels could be used as insulation panels. All tree bark showed good TC.
Lahouioui et al. (2020)	Panels	Moulding	AP, ChP, HyP, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : palm fibres <i>BI</i> : cement	TC: 0.31-1.38 W/mK; CS: 0.01-14.85 MPa. SA was lower at medium frequencies (400-1400 Hz) than at low and high frequencies. The composites made from date palm fibres showed lower SA than composites made from treated date palm fibres at low fibre content. At high fibre content the composite made from treated date palm fibres showed higher SA than untreated fibres. The untreated palm fibres composites showed

					higher WA that increased with fibre content. The higher palm fibre content, the lower MeP. The composites made from palm fibres and cement showed good PhP, ThP, MeP and AP, hence, they could be used in building energy efficiency.
Lang et al. (2020)	Panels	Pressing moulding	MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : corn stalk <i>BI</i> : cement	The higher forming pressure, the higher BD and CS. The increased was more significantly to composite made form a 25% of corn stalk. TC increased slightly with the increased of forming pressure but decreased with the increased of corn stalk content.
Li et al. (2020)	Panels	Moulding	HyP, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : sawdust <i>BI</i> : geopolymer	CS:0.43-1.71 MPa; Minimum BD: 369 kg/m ³ ; Minimum TC: 0.101 W/mK. The composite under the two-stage curing method with curing temperatures being 85°C and 70°C showed the best CS and TC, with a CS of 1.70 and 1.71 and a TC of 0.123 and 0.125, respectively.
Liuzzi et al. (2020a)	Panels	Moulding	AP, HyP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : olive pruning waste, barley straw fibres <i>BI</i> : sodium silicate solution	BD: 72-1831 kg/m ³ ; AD: 808-1895 kg/m ³ ; Bulk porosity: 0.03-0.91; Sorption capacity: 0.12-0.17; MBV: 3.29-5.05 g/m ² %RH; Penetration depth: 5.78-8.87 cm; TC: 0.058-0.062 W/mK; TD: 0.240-0.382 m ² /s; SHC: 1010-1111J/KgK; FR: 9.5-18 kPa s/m ² ; Maximum SA: 0.95 (high frequencies) and 0.8 (low frequencies). The olive pruning waste and barley straw fibre could be used to make panels for building ThI.
Liuzzi et al. (2020b)	Panels	N/S	AP, HyP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : almond skin residues <i>BI</i> : PVA, gum Arabic solution	BD: 234.65-373.10 kg/m ³ ; AD: 1162.58-1255.29 kg/m ³ ; TC: 0.074-0.082 W/mK; TD: 0.180-0.219 (x10 ⁻⁶) m ² /s; Volumetric heat capacity: 0.384-0.416 (x10 ⁶) J/m ³ K; Water vapor resistance: 13-14.9; Bulk porosity: 0.68-0.81; Air-low resistivity: 13.377-23.371 kNs/m ⁴ ; Tortuosity: 4.40-5.40. Composites outperformed the typical behaviour of porous materials and peak location was strongly depended on the thickness. The samples made from almond skin residues could be good insulators.
Marques et al. (2020a)	Panels	Hot-pressing moulding	AP, MeP	<i>BioF</i> : rice husk <i>Other filler</i> : rubber granules <i>BI</i> : toluene diisocyanate	CS: 0.15282-0.79121 MPa (at 10% strain), 1.00934-5.95155 MPa (at 50% strain); Compressive deformation: 2.86-3.03 mm (at 10% strain), 14.29-15.16 mm (at 50% strain); Dynamic: 25.877-113.903 kN/m (at 100 Hz), 19.130-146.322 kN/m (at 200 Hz). The

Anexo 1: Tabla de revisión bibliográfica

					composites made from higher rubber content showed better impact insulation performance.
Marques et al. (2020b)	Structural elements	Pressing moulding	AP, Biological resistance, HyP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : rice straw bales <i>BI</i> : lime, gypsum, plaster board and oriented strand board	SHC of rice straw: 1075-2025 J/kgK; SHC of wall with 80 and 100 kg/m ³ of rice straw bale: 2259-3847 J/kgK; Apparent D: 81.6-100.9 kg/m ³ ; TC: 0.0392-0.0478 W/mK; Thickness: 0.16-0.27 m; WA: 2.7-4.6 Kg/m ² ; FR: 989.3-1282.9 Pa s/m ² ; SRI: 15-51 dB. Raw rice straw showed a potential for energy storage. D influenced water vapour transmission, WA properties and TC. The lower D, the lower WA and TC. Conventional mortar coatings could help to improve SIN.
Marques et al. (2020c)	Panels	Hot-pressing moulding	AP, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : rice husk, expanded cork <i>BI</i> : toluene diisocyanate	BD: 183-397 kg/m ³ ; CS: 0.062-0.506 MPa; TS: 0.015-0.202 MPa; Shear strength: 0.015-0.268 MPa; Water vapour permeability: 0.006-0.110 mg/mhPa; Water vapour resistance: 6.5-114.0; TC: 0.0452-0.0798 W/mK; SHC: 1329-1793 J/kgK; SA: 0.08-0.46. The addition of rice husk improved the SA. All composites showed good ThI potential.
Mutani et al. (2020)	Structural elements	N/S	PhP, ThP	<i>BIO</i> : straw bales	R-Value: 0.150, 0.298 W/m ² K; TC: 0.076, 0.128 W/mK; TT: 0.146, 0.283 W/m ² K. The straw walls showed a good ThP.
Normaswanna Tawasil et al. (2020)	Panels	Moulding	ThP	<i>BioF</i> : sugarcane bagasse, empty fruit bunch, wood wool, pineapple leaf, coconut fibre, coconut husk <i>Other filler</i> : coffee grounds <i>BI</i> : epoxy resin, cement	Decrement factor for waste materials: 0.6062-0.787879; Time-lag to transfer the heat: 107.5-145 min. A small decrement factor showed good ThP. The coconut husk, coconut fibre and pineapple leave were the best ThI materials. All waste materials could be good ThI materials due their time-lag to transfer the heat from outer surface to inner surface.
Park et al. (2020)	Panels	Hot pressing	AP, MeP, PhP	<i>BioF</i> : wood fibres <i>BI</i> : UF-resin	SA: 0.10-0.85; NRC: 0.40-0.49; Porosity: 83.02%-89.70%; SRI: 10-30 dB; D: 154.57-254.72 kg/m ³ ; MC: 6.14%-7.22%; WA: 46.25%-72.99%; ST: 0.99%-1.82%; MOR: 0.57-2.46 MPa. SA was higher at high frequencies than at low frequencies.
Raj et al. (2020b)	Particulate samples	Pressing moulding	AP, ChP, MeP, PhP, ThP	<i>BIO</i> : jute fibres <i>Other</i> : denim	D of fibres: 1501 kg/m ³ (denim), 1452 kg/m ³ (jute); D of samples: 42-45 kg/m ³ ; TS at maximum load: 2.889 N - 1.295 N; TGA: fibres very stable up to 250 °C from this temperature samples started to decompose; Porosity: 0.9690-0.9720; Tortuosity: 1.0144-0.159; SA coefficient: 0.4-0.75 at 500 Hz, 0.6-0.9 at 1000 Hz; NRC:

Anexo 1: Tabla de revisión bibliográfica

					0.7237-0.8343 (measured) and 0.7278-0.8443 (predicted). Denim and jute fibres showed the best values of SA comparing to commercial glasswool. Denim fibres were 10 times cheaper than commercial glasswool, and jute fibres were 5 times cheaper than commercial glasswool.
Raj et al. (2020a)	Raw materials	N/S	AP, PhP, ThP	BIO: areca nut leaf sheath	NRC: 0.13-0.72. The areca nut leaf sheath was coarse, strong, rough, and thermally stable for engineering applications. The higher thickness, the higher SA, particularly at low frequencies.
Saleh et al. (2020)	Panels	Hot-pressing moulding	AP	BioF: orange peel BI: sachets water bags	The sound level was approximate level of 80 dB frequency that did not adversely affects the sensitivity of the human ear. The composite showed good AP.
Savic et al. (2020)	Panels	Moulding	HyP, MeP, PhP, ThP	BioF: miscanthus giganteous Other filler: limestone, blast furnace slag, cement clinker BI: cement, lime	D: 330-819 kg/m ³ ; CS: 0.031-1.349 MPa; MOR: 0.111-0.631 MPa; TC: 0.08-0.10 W/mK; Water content: 19.3%-81.4%; WA: 72.9%-95.7%. TC values were in the range of similar cellulose-based bio-fibre insulation materials.
Segovia et al. (2020)	Panels	Hot-pressing moulding	MeP, PhP, ThP	BioF: wood fibres BI: crude glycerol, anhydrous citric acid	D: 332-338 kg/m ³ ; TC: 0.064-0.066 W/mK; MOR: 0.85-1.13 MPa; TS parallel to surface: 0.575-0.692 MPa; TS perpendicular to surface: 0.113-0.154 MPa; CS: 1.030-1.142 MPa; Porosity: 46.36%-54.27%. TC values were higher than TC of synthetic materials.
Sharma et al. (2020)	Panels	Hot-pressing moulding	AP, PhP	BioF: bamboo, coir, banana fibre, bagasse, corn husk BI: UF-resin Catalyst: Ammonium chloride	D: 280-450 kg/m ³ ; Porosity: 50%-79%; NRC: 0.21-0.40. The higher D, the lower NRC. The board made form banana fibre showed the highest NRC.
Soltani et al. (2020)	Panels	Pressing moulding	AP, PhP	BioF: Yucca Gloriosa plant leaves BI: PVA	BD: 200 kg/m ³ ; FR: 17.730, 21.533 Nm ⁻⁴ s; Porosity: 23.39%, 85.24%; Tortuosity: 1.52, 1.84; NRC: 0.16-0.21 and 0.40-0.47; SA: 0.18-0.21 and 0.40-0.47. Maximum value of SA was obtained by introducing an air cavity behind samples.
Taban et al. (2020a)	Panels	Pressing moulding	AP, PhP	BioF: coir and date fibres BI: PVA	SA: 0.02-0.13 at 125 Hz, 0.06-0.21 at 250 Hz, 0.04-0.40 at 500 Hz, 0.14-0.77 at 1000 Hz, 0.55-0.89 at 2000 Hz, 0.51-0.89 at 4000 Hz; NRC: 0.20-0.56; BD: 100 kg/m ³ ; FR: 1535-3150 Nm ⁻⁴ s; Porosity: 81.34%-90.58%; Tortuosity: 1.18-2.8. Empirical models can be very useful to predict SA coefficients.

Anexo 1: Tabla de revisión bibliográfica

Taban et al. (2020b)	Panels	Pressing moulding	AP, ChP, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : yucca fibres <i>BI</i> : PVA	TS: 547.71-653.54 MPa; MOE: 9460-11970 MPa; EL: 5.43%-8.21%; SA coefficient: 0.290-0.463; NRC: 0.295-0.472. The higher frequency, the higher SA. The yucca fibres could be used as sound absorbing material to reduce the indoor sound pollution, because the addition of fibres improved the SA.
Taban et al. (2020c)	Panels	Pressing moulding	AP, PhP	<i>BioF</i> : kenaf fibre <i>BI</i> : PVA	BD: 150-200 kg/m ³ ; SA coefficient: 0.10-0.61; SA: 0.68-0.72; SA frequencies above 1250 Hz: 0.95 (40 mm thickness), 0.85 (30 mm thickness), 0.7 (20 mm thickness). The higher BD, the higher SA.
Tudor et al. (2020)	Panels	Hot-pressing	AP	<i>BioF</i> : spruce, larch <i>BI</i> : UF-resin, tannin	Maximum SA peak: 0.61 at 2000 Hz with 21 mm of thickness, 0.79 at 250 Hz with 20 mm of thickness (using wall clearance); Minimum SA peak: 0.31 at 2000 Hz with 11 mm of thickness. The higher thickness, the higher SA. The lower D, the higher SA. Boards with a clearance wall showed high SA.
Viel et al. (2020)	Panels	Hot-pressing moulding	HyP, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : hemp shiv <i>BI</i> : black liquor	D: 127.6-1345.2 kg/m ³ ; CS: 0.0546-0.8027 MPa; TC: 0.0628-0.1015 W/mK; MBV: 2.31-3.06 g/m ² %RH. The higher D, the higher TC. The lower D, the higher ThP and HyP. The composite could be considered as insulating building materials due its TC values.
Yoon et al. (2020)	Panels	Moulding	AP, HyP, MeP, PhP	<i>BioF</i> : kenaf <i>Other filler</i> : aluminium powder <i>BI</i> : cement, silica fume	D: 790-1850 kg/m ³ ; WA: 6.9%-38.0%; Total porosity: 8.4%-22.5%; CS (7 days): 6.7-54.6 MPa; CS (28 days): 5.5-54.6 MPa; NRC: 0.31-0.39; SA average: 0.32-0.39; SA area ratio: 0.26-0.32. The cement-based composites of highly porous showed good AP. The composites with aluminium powder and kenaf fibres showed about a 20% higher SA than cementitious material.
Zou et al. (2020)	Panels	Moulding	HyP, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : sawdust <i>BI</i> : metakaolin, sodium silicate solution, surfactant, alkali activator, hydrogen peroxide	BD: 225.6-1085.3 kg/m ³ ; TC: 0.087-0.27 W/mK; CS: 0.11-46.83 MPa. The higher wetting water quantity of the sawdust and hydrogen peroxide, the lower TC and CS. The composite made from sawdust and geopolymer showed a low TC and good CS, but its water and FIR could be improved.
Abu-Jdayil et al. (2021)	Panels	Hot-pressing moulding	ChP, HyP, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : date palm wood powder <i>BI</i> : PLA	BD: 518-1225 kg/m ³ ; TC: 0.064-0.0757 W/mK; SHC: 1292-1487 J/(kgK); TD: 0.0429-0.0549 mm ² /s; TEF: 330-365 J/(Km ² s ⁻¹); WA: 4.95-10.14%; E: 2.67-3.13 GPa; CS: 52.03-96.35 MPa; Elasticity limit: 52.03-92.79 MPa. The composites made from PLA and date palm showed low TC, TD and WA, and high CS.

Anexo 1: Tabla de revisión bibliográfica

Ali et al. (2021)	Panels	Pressing moulding	AP, MeP PhP, ThP	<i>BioF</i> : date palm leaves, wheat straw <i>BI</i> : corn-starch, wood adhesive	MOE: 0.67-2.71 MPa; Flexural stress: 0.22-0.52 MPa; Strain at MOR: 0.23-0.45; TC: 0.04595-0.05576 W/mK; D: 130-357 kg/m ³ ; SA: good results especially beyond 600 Hz. The MeP enhanced whit increasing the percentage of date palm leaves. The particleboards could be used to SA and ThI materials in construction.
Badagliacco et al. (2021)	Panels	Moulding	MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : Diss (Ampelodesmos mauritanicus), Crimson Fountaingrass (Pennisetum setaceum) <i>BI</i> : Plastocem	TC: 0.0594-0.059; BD: 267-312 kg/m ³ . Diss aggregate showed better results in MeP than crimson fountaingrass. Boiling treatment of diss fibres improved MOR and CS of the mortar.
Badouard et al. (2021)	Panels	Pressing moulding	AP, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : grape pomace <i>BI</i> : Potato starch	BD: 227-433 kg/m ³ ; AD: 934-1370 kg/m ³ ; Porosity: 67%-78%; TC: 0.0693-0.0793 W/mK; MOE: 0.8-3.6 MPa; MOR: 0.3-0.61 MPa; CS: 3-5.9 MPa; E: 11.7-36.1 MPa; SA coefficient: 0.275-0.425. The composites could be used as insulators in construction.
Barbero-Barrera et al. (2021)	Panels	Pressing moulding	ChP, HyP, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : Typha leafes particles <i>BI</i> : cement	The addition of fibre reduced the BD. The boards made from a 20% of fibre showed 10 times more of BD than boards made from a 100% of fibre. The boards made with highest cement content showed the highest mechanical strength. The boards made from a 100% of fibre showed until 9 times more of WA than the boards made from a 20% of fibre. The TC decreased with the increase of fibre content until a concentration of 60% of fibre. Typha could be used, hence, for ThI.
Beheshti et al. (2021)	Panels	Pressing moulding	AP	<i>BioF</i> : sugarcane bagasse <i>Other fillers</i> : wool of camel, goat and sheep <i>BI</i> : PVA <i>Other</i> : perforated plate of plexiglass	Camel wool showed higher SA than sheep and goat wool. Maximum SA of sheep and camel wool was 0.99 at 5000 Hz. Maximum SA of goat wool, pith and bagasse fibre was 0.97, 0.97 and 0.98 at 5000, 6300 and 6300 Hz, respectively. NRC: 0.52-0.68. The SA increased at medium frequencies by increasing the thickness of the samples. The use of the perforated plate decreased the SA at high frequencies. Therefore, this use is not recommended to frequency of more than 3000 Hz.
Boubel et al. (2021)	Raw materials	N/S	AP, PhP	<i>BIO</i> : redwood and beechwood particles	BD: 17.5-1180 kg/m ³ . The samples with small particle size showed higher SA than those with particle sizes above 16 mm.

					The samples with high thickness showed high SA. The increased of thickness displaced the first peak in the SA curves to the low frequencies. The SA values of beechwood were slightly higher than that of redwood.
Charai et al. (2021)	Panels	Pressing moulding	PhP, ThP	<i>BioF</i> : hemp <i>BI</i> : gypsum	D: 1051-1392 kg/m ³ ; TC: 0.364-0.531 W/mK; TD: 0.368-0.400 mm ² /s; SHC: 0.990-1.327 MJ/m ² K; TEF: 601-839 Ws ^{1/2} /m ² K. Hemp showed good ThP and could be a partial substitution of construction materials based in gypsum to improve the thermal comfort and the energy efficient.
Christy et al. (2021)	Particulates samples	Hot-cold pressing moulding	ChP, MeP, PhP, ThP	<i>BIO</i> : bark from hardwood	MOR: 1.471-3.972 MPa; MOE: 202.998-758.054 MPa; TS: 0.00785-0.0618 MPa; D: 440-550 kg/m ³ ; ST: 4.94%-38.06%; WA: 16.3%-47.35%; MC: 5.50%-8.39%; TC: 0.11-0.14 W/mK. The higher pressing temperature, the higher MeP and D, and the lower MC, ST and WA.
Ciaburro et al. (2021)	Panels	Moulding	AP	<i>BioF</i> : corn stalk fibres <i>BI</i> : clay	The samples made from corn stalk fibres and clay showed good SA for frequency ranges depending on the thickness of the sample and the percentage of water used. The sample with 24 mm of thickness and 6% of water showed a SA from 0.6 to 0.8 at 750-1600 Hz. The increased in thickness showed the SA peak at low frequencies, while an increase in the water content moved the SA peaks to high frequencies.
Dos Santos Siqueira et al. (2021)	Panels	Mounting	AP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : buriti foam <i>BI</i> : PVA	BD: 42.07-56.29 kg/m ³ ; HF: 198.91 W/m ² ; TC: 0.0398 W/mK; SA: 0.17-0.34. The Buriti foam showed low TC. Therefore, it could be used as ThI material.
García Sánchez et al. (2021)	Raw materials	N/S	PhP, ThP	<i>BIO</i> : fique	D: 50-80 kg/m ³ ; TC: 0.055-0.06 W/mK. The higher D, the lower TC. Fique could be a good insulator for buildings.
Gliscinska et al. (2021)	Panels	Hot-pressing moulding	AP	<i>BioF</i> : flax fibres <i>BI</i> : PLA	SA: 0.06-1.37. The composites with different structures of both surfaces of the sample showed better SA than composites with the same surfaces. The SA increased when the PLA surface was directed to the sound and a pre-pressed nonwoven was added to the composite. The shape of the composite showed a positive

Anexo 1: Tabla de revisión bibliográfica

					effect on its SA. The composites could be used in vehicles or buildings as sound absorbing materials.
Göfwald et al. (2021)	Raw materials	N/S	HyP, PhP, ThP	BIO: bark fibres from spruce trees	D: 185-277 kg/m ³ ; ST: 8.0%-18.6%; WA: 172%-305%; IB: 0.009-0.129 N/mm ² ; TC: 0.0475-0.0645 W/mK. TC values were comparable to insulation boards based on cork or wood fibres. Bark fibre insulation panels could be a conventional insulation board if the D could be decreased.
Guna et al. (2021)	Panels	Hot-pressing moulding	AP, HyP, MeP, PhP, ThP	BioF: mulberry stems BI: PP	Theoretical D: 560-1280 kg/m ³ ; Experimental D: 500-1250 kg/m ³ ; TC: 0.130-0.175 W/mK; TR: 5.71-7.69 mK/W; The highest SRI: 46.6 dB at 800 Hz; WA: 9.5%-24.3%. The composite made from a 90% of mulberry stems and a 10% of PP showed the best MeP. The increased of D from 500 to 1250 kg/m ³ improved the MeP, ThP, AP and HyP.
Jeon et al. (2021)	Panels	Hot pressing	HyP, MeP, PhP, ThP	BioF: wood chips Other filler: spruce biochar BI: UF-resin Additive: NH ₄ CL	D: 620-670 kg/m ³ ; MOR: 7.67-13.19 MPa; WA: 6.10%-6.92%; Porosity: 59.89%-82.14%; TC: 0.09301-0.10108 W/mK; TR: 0.1262-0.1384 m ² W/K; SHC: 1.729-1.783. The composites with biochar showed lower TC than the composites without it. The composites could be used in construction due its ThP.
Jin et al. (2021)	Panels	Hot pressing	AP, ChP, HyP, PhP, ThP	BioF: jute fibres Other: polyester fibres	BD: 152-250 kg/m ³ ; TC: 0.0372-0.0418 W/mK; NRC: 0.30-0.65; MAB: 19.16-69.42 g/m ² (3 h), 21.72-96.32 g/m ² (6 h), 22.45-138.71 g/m ² (12 h), 23.46-183.05 g/m ² (24 h); Moisture desorption amount: 22.47-146.21 g/m ² (24 h); Desorption rate: 79.87%-96.61%. TC values were comparable for commercial glass/rock wool insulation materials. The increased of thickness or D showed an improved in SA.
Karlinasari et al. (2021)	Panels	N/S	AP, HyP, PhP	BioF: bamboo BI: MDI-resin Covering: PU	Surface roughness: 1.07-8.37 μm; Contact angle: 75.80°-114.30°; ST: 2.08%-8.16%; WA: 33.09%-127.30%; NRC: 0.11-0.26. The PU covering decreased the ST and WA, increased the SA at frequencies lower than 600 Hz, and decreased the SA at frequencies higher than 2000 Hz.
Kolya y Kang (2021a)	Raw materials	N/S	AP, PhP, ThP	BIO: palmwood	D: 350-370 kg/m ³ ; Absorbed water in 10 días: 3.39-4.43 g; SA: 0.107-0.163. The steam explosion at low pressure increased the flow path of the fibre direction and increased the air

Anexo 1: Tabla de revisión bibliográfica

					permeability and the SA. The steam explosion could be used to improve the SA of palmwood.
Kolya y Kang (2021b)	Raw materials	N/S	AP, PhP, ThP	BIO: Paulownia hardwood	D: 290-380 kg/m ³ (before treatment), 280-370 kg/m ³ (after treatment). The SA of paulownia treated with HyP was 81.8%, better than untreated paulownia at 2000 Hz.
Mahieu et al. (2021)	Panels	Hot-pressing moulding	HyP, MeP, ThP	BioF: flax shives, sunflower bark BI: casein, potassium hydroxide	MOR: 0.8-12.3 MPa; MOE: 127-1216 MPa; IB: 0.02-0.24 N/m ² ; TC: 0.072-0.0893 W/mK; WA: 103%-274%; ST: 18%-101%. Boards made with big particles showed better MeP than small particles. Flax shive panels showed better MeP than sunflower bark-based panels. The binderless boards showed lower TC.
Mayer-Laigle et al. (2021)	Panels	Pressing moulding	PhP, ThP	BioF: maize pith BI: alginate	D: 23-37 kg/m ³ ; TC: 0.035-0.039 W/mK; Volumetric heat capacity: 0.916-1.115 (x10 ⁻⁶) J/m ³ K. Insulation boards made from fractionated pith showed TC similar to the manual pith extraction because the pith structure was not affected by the fabrication process.
Merli et al. (2021)	Panels	Hot-pressing moulding	AP, PhP, ThP	BioF: wood (pine, oak, mahogany), olive pruning waste BI: vinyl glue, flour glue	D: 282-405 kg/m ³ ; TC: 0.080-0.095 W/mK. Oak panels showed the best AP. The hot-press technique increased SI up to 2.5 dB with natural glue. Mahogany showed the lowest TC. Pressing did not influence in ThP. TC decreased about 2% with the addition of olive waste.
Munir et al. (2021)	Structural elements	Moulding	HyP, MeP, PhP, ThP	BioF: rice husk Other filler: glass sludge, marble sludge BI: clay	TC: 0.45-0.52 W/mK. The bricks with waste materials showed the minimum CS and MOR requirements for building bricks. Thus, all the combination of bricks could be used for masonry construction.
Novais et al. (2021)	Panels	Moulding	AP, HyP, MeP, PhP, ThP	BioF: cork BI: fly ash, metakaolin	Lowest TC: 0.068 W/mK. Highest CS: 19 MPa. Highest MOR: 5.3 MPa. The addition of cork decreased the BD, TC and MeP, but increased the HyP. The samples with more than an 80% cork content showed good SA.
Ostendorf et al. (2021)	Panels	Pressing	ChP, MeP, PhP, ThP	BioF: woof fibres BI: MDI-resin, PP carbonate Additives: canola hulls, kraft lignin	D: 145.77-168.56 kg/m ³ ; TC: 0.039-0.042 W/mK; IB increased with the amount of MDI-resin; CS increased when diluting MDI-resin with PP carbonate. Higher D, higher TC.
Pachla et al. (2021)	Panels	Moulding	AP, MeP, ThP	BioF: rice husk, rice straw BI: cement	CS: 2.44-3.42 MPa; MOR: 1.38-1.66 MPa; MOE: 10.97-13.51 MPa; TC: 0.2133-0.3009 W/mK. _Composites made from rice straw

Anexo 1: Tabla de revisión bibliográfica

					showed high SA at frequency range from 50 to 1250 Hz. The addition of straw reduced the TC. Longer straw showed better ThP than shorter straw.
Parcesepe et al. (2021)	Panels	Moulding	HyP, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : hemp fibres <i>BI</i> : plaster	MOR: 1.58-4.96 MPa; CS: 3.36-9.90 MPa; TC: 0.44-0.55 W/mK; BD: 1760-1880 kg/m ³ ; Wet D: 2100-2120 kg/m ³ ; Apparent porosity: 23.0%-33.4%; WA: 12.2%-19.0%. The higher fibre content, the lower TC.
Pásztor et al. (2021)	Panels	Pressing	MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : drill and planer shavings from spruce <i>BI</i> : UF-resin, MDI-resin	D: 150-400 kg/m ³ ; Lowest TC: 0.05 W/mK; MOR: 0.123-2.594 MPa. The thinner planer shaving showed better ThP than the thicker drill shavings. TC decreased with compression for both drill and planer shavings. The optimum D for minimum TC was around 150 kg/m ³ .
Quintana-Gallardo et al. (2021)	Panels	Pressing Mounted	AP, Life cycle assessment, ThP	<i>Structure</i> : pine wood (BIO) <i>Core</i> : rice straw (BIO) <i>Exterior layer</i> : lime mortar <i>Interior layer</i> : clay mortar	The panel made from rice Straw showed the best AP at medium frequencies (500-2000 Hz); SRI: 47 dB; TT: 0.29-0.33 W/m ² K. The rice straw façade reduced the TT of the double layer brick façade by half. The rice straw façade showed good AP and ThP.
Quiñones-Bolaños et al. (2021)	Panels	N/S	MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : coconut fibre <i>BI</i> : cement	Heat absorption: 1366-3251 J/g; Dry D: 1561 kg/m ³ ; SHC: 2079 J/kgK; Lowest TC: 0.27 W/mK; CS: 8.7 MPa; MOR: 10.5 MPa. Coconut fibres improved the ThP of mortars. The addition of 15% of coconut fibre in cement decreased the TC from 1.4 to 0.27 W/mK.
Ricciardi et al. (2021)	Panels	Pressing moulding	Life cycle assessment, ThP	<i>BioF</i> : cork scraps, rice husk <i>Other filler</i> : coffee chaff, rubber granulate <i>BI</i> : PU glue	TC: 0.057-0.210 W/mK. The panel made from cork and rice husk showed the lowest TC. The plasteboard support showed the highest TC, followed by the panel made from cork and rubber granulate and the panel made from cork, rubber granulate, rice husk and coffee chaff. All the combination panels could be used as ThI in construction.
Samaei et al. (2021a)	Panels	Pressing moulding	AP, PhP	<i>BioF</i> : yucca, kenaf <i>BI</i> : PVA	SA: 0.19-0.89; NRC: 0.33-0.53. The different variants of composites made from kenaf and yucca fibres in different proportions could be used to SIN. The SA peak moved to low frequencies with the increased of kenaf content. A composite made from a 70% of kenaf and a 30% of yucca showed the highest AP.

Samaei et al. (2021b)	Panels	Pressing moulding	AP, PhP	<i>BioF</i> : rice husk, kenaf <i>BI</i> : PVA	D: 200 kg/m ³ ; Porosity: 75.6%-85.2%; Tortuosity: 1.08-1.25; SA coefficient: 0.5-0.66. Samples made from a BI content of 15%, and a fibre to granule ratio 2.33 showed the highest SA. The samples with rice husk and kenaf showed higher AP than composites made with only one of the two.
Taban et al. (2021a)	Panels	Pressing moulding	AP, PhP	<i>BioF</i> : date palm fibres <i>BI</i> : PVA	BD: 125-175 kg/m ³ ; FR: 1879-4105 N/m ⁴ s; Porosity: 81.79%-88.47%; Tortuosity: 1.00-2.53; SA coefficient: 0.336-0.520; AFR: 1879-4105. The sample made from date palm fibres, PVA with a thickness of 55 mm and a BD of 175 kg/m ³ showed the best AP.
Taban et al. (2021b)	Panels	Moulding	AP, PhP	<i>BioF</i> : bagasse, corn husk <i>BI</i> : PVA	Porosity: 84.09%-88.79%; FR: 10230-14200 Ns/m ⁴ ; SA: 0.011-0.95; NRC: 0.37-0.72. The higher thickness, the higher SA. The incorporating of air gap in composites showed an increased in AP.
Taban et al. (2021c)	Panels	Pressing moulding	AP, PHP	<i>BioF</i> : kenaf fibre <i>BI</i> : PVA	BD: 125-200 kg/m ³ ; Porosity: 85.50%-91.84%; FR: 2282-6844 N/m ⁴ s; SA: 0.03-0.96; NRC: 0.09-0.65. The higher sample thickness, the higher AP.
Tămas-Gavrea et al. (2021)	Panels	Pressing moulding	AP, MeP, ThP	<i>Exterior panels</i> : perlite, white cement, lime <i>Core panels</i> : <i>BioF</i> : flax fibre; <i>BI</i> : white cement	CS: 0.011-0.024 MPa; MOR: 0.126-0.171 Mpa; TC: 0.07098-0.07257 W/mK; SA: 0.89-0.95. The smaller particle size, the lower SA. AP were better in perforated samples, but when the hole diameter increased, the SA decreased.
Tudor et al. (2021)	Panels	Hot-pressing	AP	<i>BioF</i> : larch bark <i>BI</i> : UF-resin	NRC: 0.10-0.30 (30 mm of thickness), 0.15-0.50 (60 mm of thickness). Boards with fine-grained particles showed better SA than coarse-grained particles. The SA was better for boards with lower D than for higher D. The boards with highest thickness showed better SA than boards with lowest thickness.
Vitale et al. (2021)	Particulate samples	Pressing moulding	HyP, MeP, PhP, ThP	<i>BIO</i> : orange peel	BD: 468.63-558.46 kg/m ³ ; Lowest TC: 0.066 W/mK; MOR: 0.02-0.09 MPa; MOE: 3.57-34.79 MPa. The orange peel could be used as ThI material. The addition of dried peels increased the porosity and decreased the MeP.
Zhang et al. (2021)	Panels	Moulding	HyP, MeP, PhP, ThP	<i>BioF</i> : corn stalks <i>BI</i> : cement	D: 0.060-0.131 kg/m ³ ; TC: 0.087-0.165 W/mK; Heat capacity: 0.101-0.178 J/kgK; TD: 1.16 (x10 ⁻⁷)-8.0 (x10 ⁻⁸) m ² /s K; MBV: 0.88-1.07 (x10 ⁻⁹) m ² /s; CS: 1.80-2.15 MPa. Composites made from

Anexo 1: Tabla de revisión bibliográfica



					magnesium phosphate cement and corn stalks showed good HyP.
<p>AD: Absolute Density; AFR: Air Flow Resistance; AP: Acoustical Properties; APD: Average Pore Diameter; AR: Acoustic Resistance; BD: Bulk Density; BI: Binder; BIO: Biomass; BioF: Biomass Filler; ChP: Chemical Properties; CS: Compressive Strength or Stress; CM: Compressive Modulus; D: Density; DME: Dynamic Modulus of Elasticity; DM: Dynamic Modulus; E: Young Modulus, E or Modulus of Elasticity; EL: Elongation at break; EPS: Expanded Polystyrene; FIR: Fire Resistance; FR: Flow Resistivity; HDPE: High-D Polyethylene; HDT: Heat Deflection Temperature or Heat Distortion Temperature; HF: Heat Flow Rate; HFR: Heat Flow Resistance; HyP: Hygroscopic Properties; IB: Internal Bond Strength; IR: Impact Resistance; IST: Impact Strength; LDPE: Low Density Polyethylene; LM: Loss Modulus; MAB: Moisture Absorption; MAH: Maleic Anhydride; MBV: Moisture Buffer Value; MC: Moisture Content; MDI-resin: Methylene Diphenyl Diisocyanate resin; MeP: Mechanical Properties; MOE: Flexural Modulus or Modulus of Elasticity in bending; MOR: Flexural or Bending Strength; MUF-resin: Melamine Urea Formaldehyde resin; NRC: Noise Reduction Coefficient; N/S: Not Specified; PE: Polyethylene; PET: Polyethylene Terephthalate; PF-resin: Phenol Formaldehyde resin; PhP: Physical Properties; PLA: Poly Lactic Acid; PP: Polypropylene; PS: Polystyrene; PSD: Pore Size Distribution; PSI: Pounds per Square Inch; PU: Polyurethane; PVA: Polyvinyl Alcohol; R-value: thermal insulance factor; RH: Relative Humidity; SA: Sound Absorption; SAB: Steam Absorption; SG: Specific Gravity; SHC: Specific Heat Capacity; SIN: Sound Insulation; SM: Storage Modulus; SRI: Sound Reduction Index, Sound Transmission Loss or Sound Loss; ST: Swelling Thickness; STC: Sound Transmission Class; TC: Thermal Conductivity; TD: Thermal Diffusivity; TEF: Thermal Effusivity; TGA: Thermogravimetric Analysis; ThI: Thermal Insulator or insulation; ThP: Thermal Properties; TR: Especific Thermal Resistance; TS: Tensile Strength; TStb: Thermal Stability; TT: Thermal Transmittance or Heat Transfer Coefficient; UF-resin: Urea-Formaldehyde resin; UP-resin: Unsaturated Polyester resin; VHC: Volumetric Heat Capacity; WA: Water Absorption; Wt.%: Weight Percentage</p>					



ANEXO 2

AUTORIZACIÓN DE RECOGIDA DE CAMALOTE



O F I C I O

S/REF.

N/REF.

FECHA Badajoz, 14 de agosto de 2019

ASUNTO

TRASLADO DE AUTORIZACIÓN

ALBA CHAVES ZAPATA
Avda. Reina Sofía, 24, Portal 6, 2º E
06800 MÉRIDA (BADAJOZ)

EXPEDIENTE DE AUTORIZACIÓN ADMINISTRATIVA PARA REALIZAR RECOGIDA DE MUESTRAS DE *EICHHORNIA CRASSIPES* (CAMALOTE) EN EL RÍO GUADIANA PARA TRABAJO DE TESIS DOCTORAL EN LA UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA.

PETICIONARIO: Alba Chaves Zapata con D.N.I.: 07.268.134-L

Con fecha 19 de Agosto de 2019, El Director Técnico de la Confederación Hidrográfica del Guadiana, ha resuelto lo siguiente:

1. ANTECEDENTES DE HECHO

D^a. Alba Chaves Zapata con D.N.I.: 07.268.134-L, presenta una solicitud para tomar muestras de Jacinto de agua con el objeto de realizar un estudio basado en la aplicación de biomásas como aislantes térmicos y acústicos, entre estas biomásas se encuentra el camalote. Dicho trabajo forma parte de la Tesis Doctoral que está desarrollado en la Universidad de Extremadura. Para ello, solicita transportar planta que está siendo retirada del río Guadiana. Para garantizar las medidas de seguridad el transporte del Camalote se realizara en bidones sellados y lacrados hasta su destino.

El Jacinto de agua o camalote (*Eichhornia crassipes*), es una especie invasora, es decir, se trata de una especie exótica que se introduce o establece en un ecosistema o hábitat natural o seminatural, y que es agente de cambio y amenaza para la diversidad biológica nativa, ya sea por su comportamiento invasor, o por el riesgo de contaminación genética.

Como tal, se encuentra incluida en el Anexo del Real Decreto 630/2013, de 2 de agosto, por el que se regula el Catálogo español de especies exóticas invasoras. Es por esto que sea de suma importancia la aplicación de las condiciones técnicas, generales y particulares que se expresan en el siguiente punto.

2. FUNDAMENTOS DE DERECHO

2.1 DE ORDEN JURÍDICO-FORMAL

Compete al Presidente de la Confederación Hidrográfica dictar la presente resolución y a la Dirección Técnica, su tramitación y propuesta, de conformidad con lo establecido en el Real Decreto 927/88, de 29 de julio (BOE de 31 de agosto) por el que se aprueba el Reglamento de la Administración Pública del Agua y de la Planificación Hidrológica y en el Real Decreto 984/89 de 28 de julio (BOE de 2 de agosto) por el que se determina la estructura orgánica dependiente de la Presidencia de las Confederaciones Hidrográficas.

SALIDA DE
SERVICIO APLICACIONES FORESTALES
FECHA: 21-Agosto-2019

CORREO ELECTRÓNICO: directortecnico@chguadiana.es

BADAJOZ
Sinforiano Madroño, 12 Ctra. de Porzuna, 6
06011 Badajoz
Telf. 924 21 21 00
Fax 924 21 21 40

CIUDAD REAL
12 Ctra. de Porzuna, 6
13002 Ciudad Real
Telf. 926 27 49 42
Fax 926 23 22 88

MÉRIDA
Avda. Reina sofía, s/n
06800 Mérida
Telf. 924 31 66 00
Fax 924 33 09 70

DON BENITO
Avda. de Badajoz, s/n
06400 Don Benito
Telf. 924 81 08 87
Fax 924 80 00 08

Código Seguro de Verificación: MA0050NZVP55MCHM+LLN01YW011566285068. Permite la verificación de la integridad de una copia de este documento electrónico en la dirección: <https://sede.mapama.gob.es/>

FIRMADO POR	NICOLAS CIFUENTES DE LA CERRA		FECHA	20/08/2019 09:12:13
ID. FIRMA	afirma.redsara.es	MA0050NZVP55MCHM+LLN01YW011566285068	PÁGINA	1/4
 MA0050NZVP55MCHM+LLN01YW011566285068				



2.2 DE ORDEN JURÍDICO-MATERIAL

La presente resolución comporta la utilización del Dominio Público Hidráulico, en la forma prevista en el Art. 126 y siguientes del R.P.D.H., considerándose que no se producirá deterioro alguno del citado Dominio Público.

Con base en lo anterior y vista la normativa de aplicación, el DIRECTOR TÉCNICO acepta la propuesta realizada y RESUELVE:

AUTORIZAR a D^a. Alba Chaves Zapata con D.N.I.: 07.268.134-L al traslado de la cantidad de planta necesaria para su estudio en un vehículo, siempre sujeto al siguiente condicionado.

Las características principales de la solicitud son las siguientes:

- a) **Situación:** Diferentes tramos del Río Guadiana.
- b) **Características de las actuaciones:** Retirada, llenado de los bidones, precintado con tapadera y transporte hasta el centro universitario de Mérida, estudio del Jacinto de agua y finalmente, su destrucción que tendrá que certificar a nuestro servicio.
- c) **Infraestructura afectada:** Río Guadiana.

La autorización queda sujeta al cumplimiento de las siguientes CONDICIONES:

A) CONDICIONES TÉCNICAS

- 1^a. En todo momento se deben cumplir con los condicionantes legales incluidos en el Real Decreto 630/2013, de 2 de agosto, por el que se regula el Catálogo español de especies exóticas invasoras.
- 2^a. El control de las condiciones de depósito de las plantas en la parcela destinada al objetivo de la presente autorización, estará bajo el control y la supervisión de personal de Confederación Hidrográfica del Guadiana.
- 3^a. El personal de Confederación tiene que tener acceso a las instalaciones donde se produzcan estos estudios, a fin de comprobar que se están cumpliendo con los condicionantes recogidos en la presente autorización.
- 4^a. La presente autorización **se concede con fines científicos**.
- 5^a. En todo momento se informará a la Confederación Hidrográfica del Guadiana de los resultados que se vayan obteniendo de los ensayos realizados.
- 6^a. Está prohibido la venta o el traspaso de las plantas de Jacinto de agua.
- 7^a. Se prohíbe el abandono de plantas de Jacinto de agua ya que pueden suponer un riesgo de dispersión a otras zonas no invadidas, por lo que habrá que proceder a su destrucción. Al igual que su depósito, su destrucción debe ser supervisada por la Confederación Hidrográfica del Guadiana.
- 8^a. Los gastos derivados de la destrucción, en el caso de que lo haya, del excedente de planta, correrán a cargo del solicitante de la autorización.

CONFEDERACIÓN
HIDROGRÁFICA
DEL GUADIANA

Código Seguro de Verificación: MA0050NZVP55MCHM+LLN01YW011566285068. Permite la verificación de la integridad de una copia de este documento electrónico en la dirección: <https://sede.mapama.gob.es/>

FIRMADO POR	NICOLAS CIFUENTES DE LA CERRA		FECHA	20/08/2019 09:12:13
ID. FIRMA	afirma.redsara.es	MA0050NZVP55MCHM+LLN01YW011566285068	PÁGINA	2/4
				
MA0050NZVP55MCHM+LLN01YW011566285068				



B) CONDICIONES GENERALES

- 1ª. Se entenderá otorgada esta autorización sin menoscabo del derecho de propiedad y sin perjuicio de tercero, reservándose la Administración la facultad de anularla cuando lo estime conveniente, sin derecho a indemnización, con obligación de conservar las servidumbres existentes.
- 2ª. El autorizado será responsable de cuantos daños y perjuicios puedan ocasionarse a intereses públicos o privados como consecuencia de la ejecución y establecimiento de lo autorizado, quedando obligado aquél a su reparación incluidas las indemnizaciones que procedan, y no generará para el mismo ningún tipo de derecho frente a la CHG.
- 3ª. Esta autorización no permite el establecimiento de ninguna clase de obra, salvo la autorizada, ni el depósito definitivo de acopios dentro del dominio público ni en zona de policía. Sólo se permitirán, temporalmente, los acopios necesarios para la ejecución de los trabajos autorizados. Al finalizar los trabajos se exigirá el acondicionamiento del terreno a fin de restituir a su estado inicial el entorno.
- 4ª. Dicha autorización será independiente de cualquier otra que haya de ser otorgada por los distintos Órganos de las Administraciones Públicas.
- 5ª. La inspección y vigilancia de los trabajos a efectos de replanteo y vigilancia, quedarán a cargo de la CHG, siendo de cuenta del peticionario las remuneraciones y gastos que por estos conceptos puedan originarse.
- 6ª. Podrá ser revocada esta autorización por incumplimiento de cualquiera de las condiciones y en los casos previstos en las Leyes, declarándose la revocación por resolución motivada de este Organismo.

C) CONDICIONES PARTICULARES

- 1ª. Los trabajos se ajustarán a la documentación aportada por el peticionario y que consta en el expediente, en tanto no resulten modificadas por las condiciones en que se otorgue la Autorización. Las modificaciones de detalle que se pretendan introducir podrán autorizarse u ordenarse por la CHG, siempre que no alteren las características esenciales de la Autorización, en caso contrario implicaría la tramitación de un nuevo expediente.
- 2ª. Previamente a cada toma de muestra se notificará al Área de Calidad Ambiental la fecha prevista de inicio de los trabajos con objeto de que se proceda al señalamiento de las zonas y trabajos autorizados (Tfno.: 924316600).
- 3ª. Los trabajos de extracción, llenado de bidones, transporte hasta el lugar de estudio y destrucción deben hacerse siempre en presencia de personal autorizado por el Área de Calidad Ambiental.
- 4ª. El transporte tiene que garantizar que no haya pérdidas de la planta.
- 5ª. La descarga de los bidones se realizara en el destino (Centro Universitario de Mérida situado en la Avda. Santa Teresa de Jornet, 38- 06800 Mérida (Badajoz)) y se hará en presencia de personal de la C.H.G. u otro personal autorizado expresamente por la C.H.G., así como su incineración al finalizar el estudio.
- 6ª. Todos los restos de la planta no eliminados deberán ser quemados y/o enterrados.
- 7ª. El mantenimiento de los trabajos realizados, una vez finalizados, serán responsabilidad del autorizado, quien deberá hacer frente a todos los gastos derivados de aquél, siendo en consecuencia el responsable de los daños, tanto a personas como a bienes, derivados del incorrecto mantenimiento de los mismos.

CONFEDERACIÓN
HIDROGRÁFICA
DEL GUADIANA

Código Seguro de Verificación: MA0050NZVP55MCHM+LLN01YWO11566285068. Permite la verificación de la integridad de una copia de este documento electrónico en la dirección: <https://sede.mapama.gob.es/>

FIRMADO POR	NICOLAS CIFUENTES DE LA CERRA		FECHA	20/08/2019 09:12:13
ID. FIRMA	afirma.redsara.es	MA0050NZVP55MCHM+LLN01YWO11566285068	PÁGINA	3/4
 MA0050NZVP55MCHM+LLN01YWO11566285068				



- 8ª. Al finalizar los trabajos, el autorizado deberá presentar un informe lo suficientemente detallado sobre lo realizado ante esta Confederación.
- 9ª. Se debe garantizar que una vez finalizados los estudios el material vegetal quedara destruido.
- 10ª. No procede el cobro de tasas, ya que el estudio tiene fines científicos.
- 11ª. Los trabajos deberán quedar totalmente finalizados en un **plazo máximo de DOCE (12) MESES** contados a partir de la fecha de firma de esta notificación.

De conformidad con lo establecido en el artículo 22 apartado 2 del texto refundido de la Ley de Aguas, aprobado por el Real Decreto legislativo 1/2001, de 20 de julio (BOE nº 176, de 24-07-01), modificado por la Ley 62/2003, de 30 de diciembre (BOE nº 313, de 31-12-03), y por el Real Decreto Ley 4/2007, de 13 de abril (BOE nº 90, de 14-04-07), esta Resolución pone fin a la vía administrativa, y contra la misma puede interponerse Recurso Contencioso-Administrativo ante la Sala de lo Contencioso-Administrativo del Tribunal Superior de Justicia de Extremadura, en el plazo de DOS MESES a partir del día siguiente a su notificación, de conformidad con lo dispuesto en el artículo 46 de la Ley 29/1998, de 13 de julio, reguladora de la Jurisdicción Contencioso-Administrativa (BOE nº 167, de 14-07-98).

Asimismo, contra este acuerdo podrá interponerse potestativamente recurso de reposición en el plazo de UN MES a partir del día siguiente a su notificación ante este Organismo, de acuerdo con lo dispuesto en el artículo 116 y siguientes de la Ley 30/1992, de 26 de noviembre, de Régimen Jurídico de las Administraciones Públicas y del Procedimiento Administrativo Común (BOE nº 285, de 27-11-92), modificada por la Ley 4/1999 (BOE nº 12, de 14-01-99).

EL JEFE DE ÁREA DE CALIDAD AMBIENTAL

Nicolás Cifuentes de la Cerra

(firmado digitalmente)

CONFEDERACIÓN
HIDROGRÁFICA
DEL GUADIANA

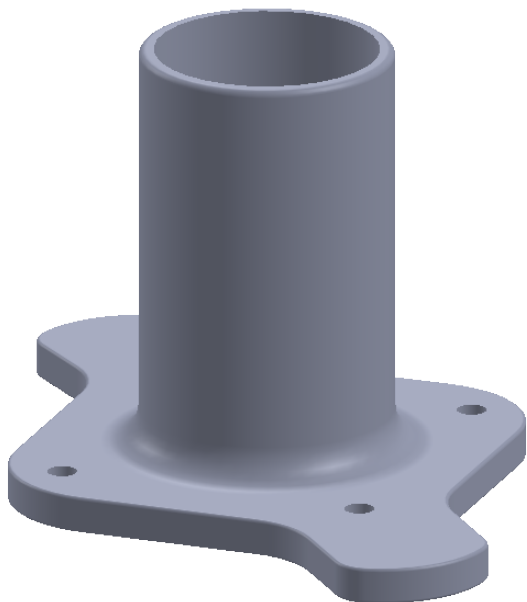
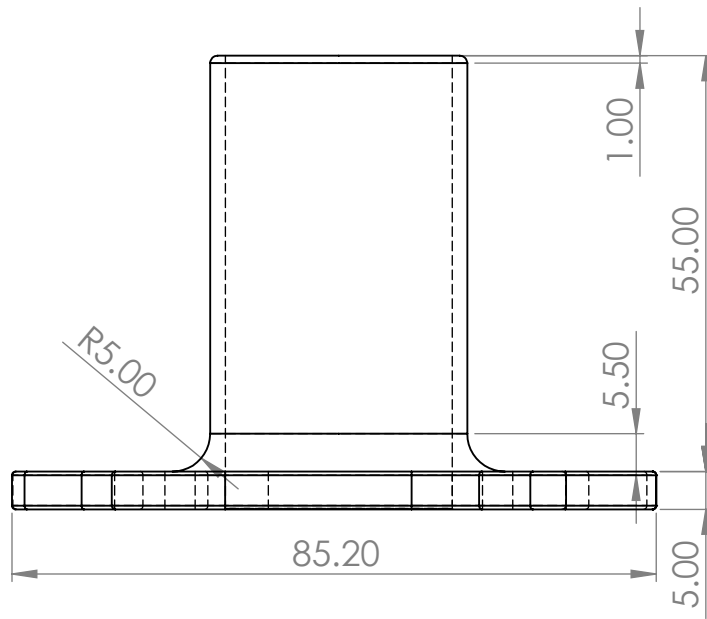
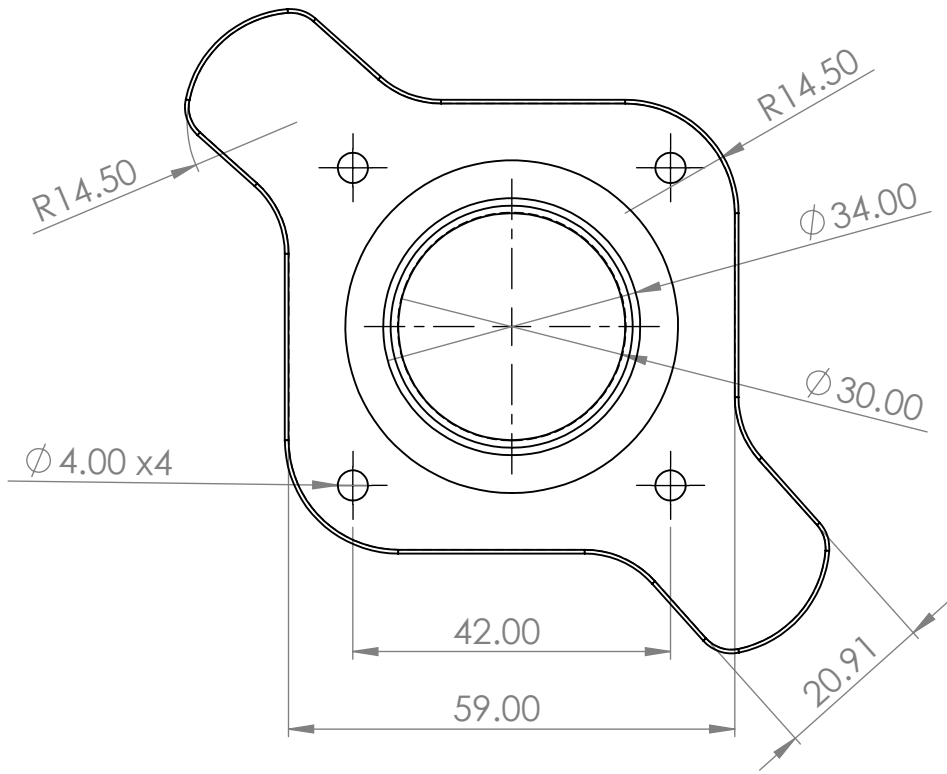
Código Seguro de Verificación: MA0050NZVP55MCHM+LLN01YWO11566285068. Permite la verificación de la integridad de una copia de este documento electrónico en la dirección: <https://sede.mapama.gob.es/>

FIRMADO POR	NICOLAS CIFUENTES DE LA CERRA		FECHA	20/08/2019 09:12:13
ID. FIRMA	afirma.redsara.es	MA0050NZVP55MCHM+LLN01YWO11566285068	PÁGINA	4/4
 MA0050NZVP55MCHM+LLN01YWO11566285068				



ANEXO 3

PLANOS DE MOLDES DISEÑADOS PARA LA FABRICACIÓN DE LAS
MUESTRAS



TÍTULO:

ANEXO 3.1

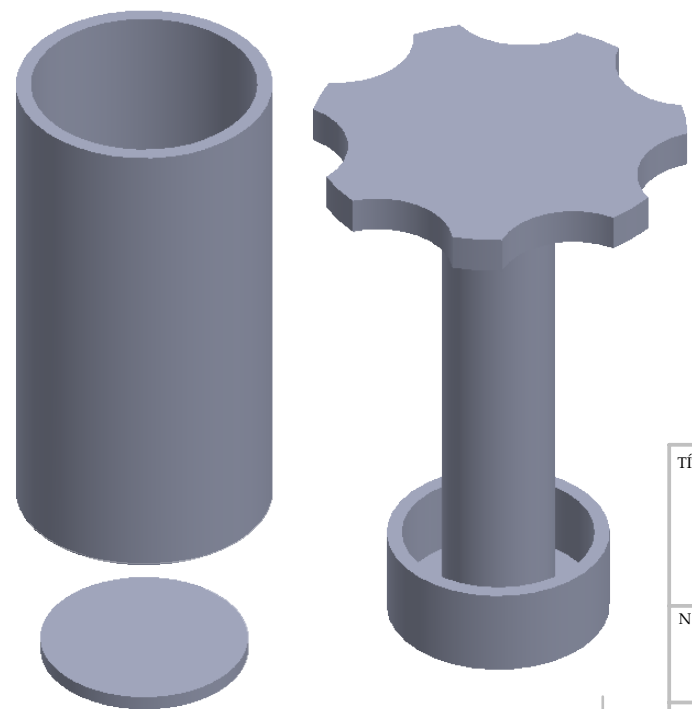
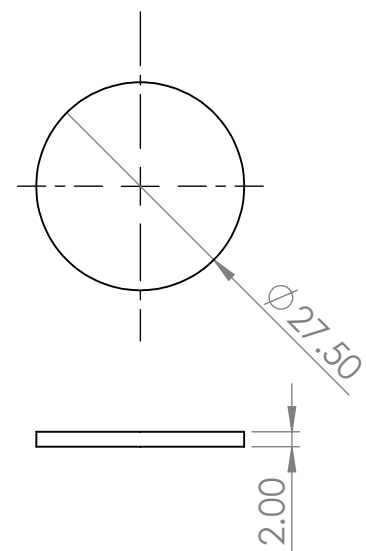
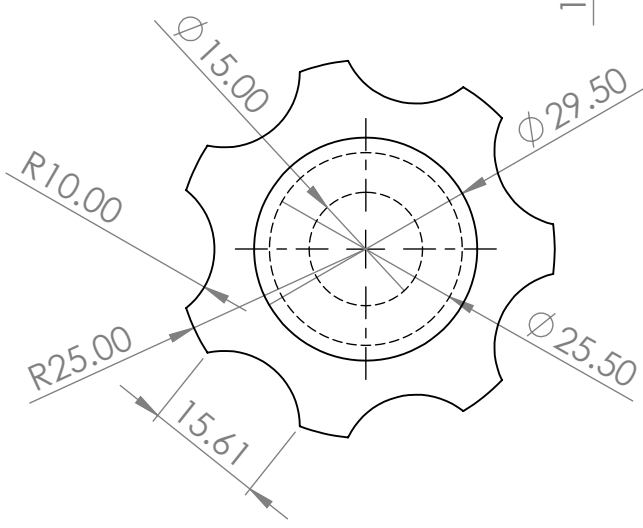
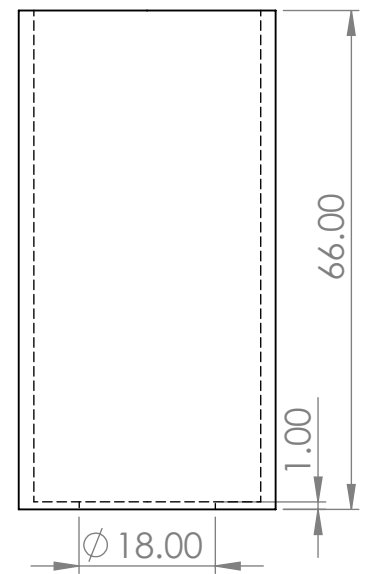
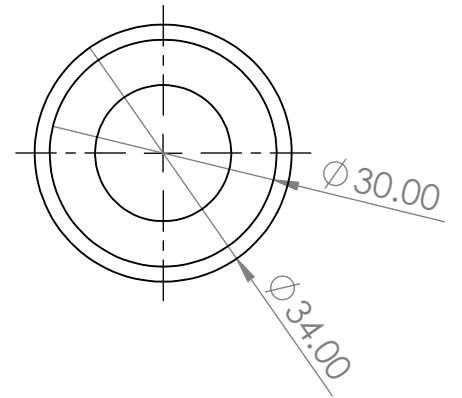
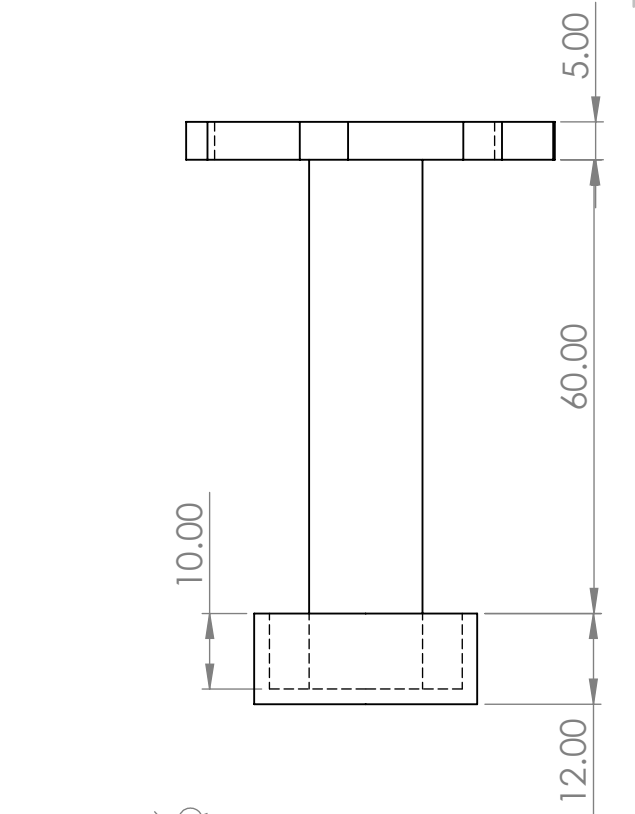
N.º DE DIBUJO

Primer prototipo molde (figura 3.9)

A4

ESCALA:1:1

Cotas en mm



TÍTULO:		ANEXO 3.2	
N.º DE DIBUJO		A4	
Molde con pistón (figura 3.11)			
ESCALA:1:1	Cotas en mm		

4 3 2 1

F

F

E

E

D

D

C

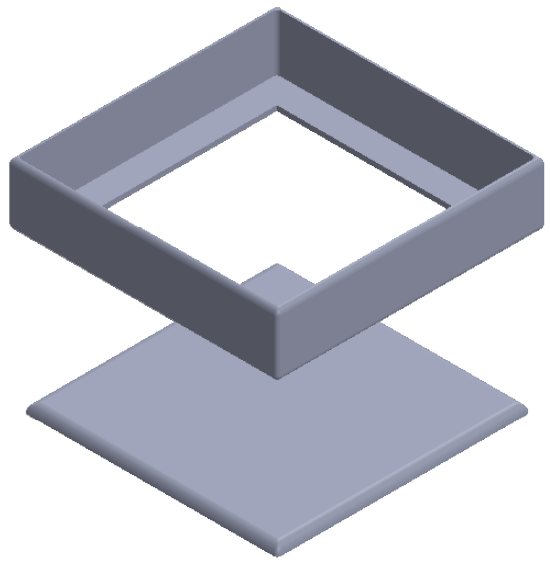
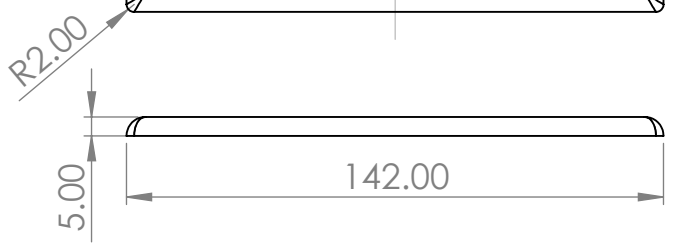
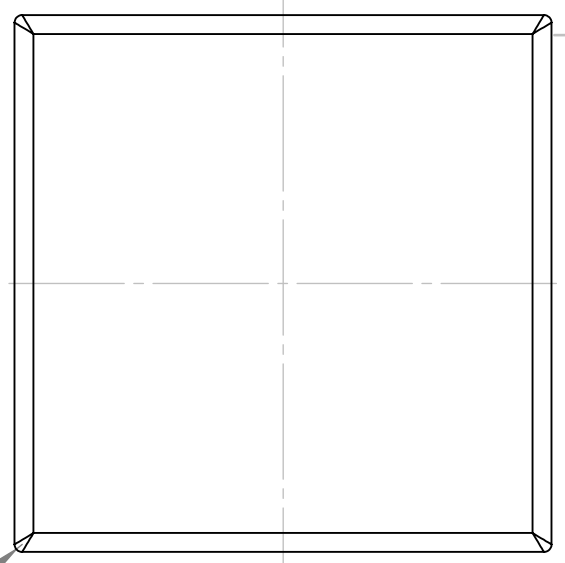
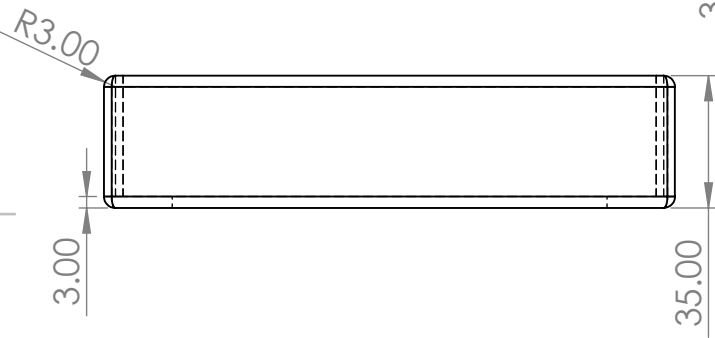
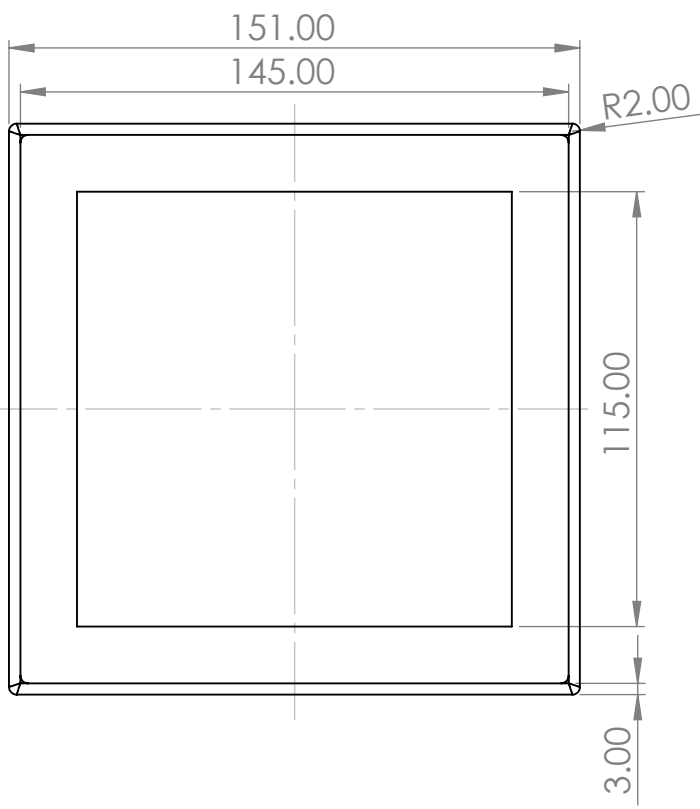
C

B

B

A

A



TÍTULO:		ANEXO 3.3	
N.º DE DIBUJO		A4	
Molde muestras ensayos mecánicos			
ESCALA:1:2	Cotas en mm		

4 3 2 1