

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL

**TABLEROS TERMOACÚSTICOS TIPO SÁNDWICH FABRICADOS DE MADERA
BALSA O FIBRA DE PIÑA Y CHAPAS DE MELINA, CARTAGO, COSTA RICA**

**PROYECTO DE GRADUACIÓN PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO
FORESTAL CON ÉNFASIS EN MANEJO Y PRODUCCIÓN FORESTAL CON EL
GRADO ACADÉMICO DE LICENCIATURA**

GEOVANNY ANDRÉS VILLALTA CÉSPEDES

CARTAGO, COSTA RICA, 2024

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL

**TABLEROS TERMOACÚSTICOS TIPO SÁNDWICH FABRICADOS DE MADERA
BALSA O FIBRA DE PIÑA Y CHAPAS DE MELINA, CARTAGO, COSTA RICA**

**PROYECTO DE GRADUACIÓN PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO
FORESTAL CON ÉNFASIS EN MANEJO Y PRODUCCIÓN FORESTAL CON EL
GRADO ACADÉMICO DE LICENCIATURA**

GEOVANNY ANDRÉS VILLALTA CÉSPEDES

CARTAGO, COSTA RICA, 2024

TABLEROS TERMOACÚSTICOS TIPO SÁNDWICH FABRICADOS DE MADERA Balsa O FIBRA DE PIÑA Y CHAPAS DE MELINA, CARTAGO, COSTA RICA

RESUMEN

Andrés Villalta Céspedes*

La eficiencia energética en las edificaciones y la utilización de materiales renovables son de vital importancia para apaciguar la crisis climática y los problemas en la salud humana. El uso de biomateriales como la madera y las fibras naturales para la aislación de las edificaciones es una alternativa para disminuir la gran cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) debido a que son actividades antropogénicas causantes de un acelerado cambio climático.

El presente estudio analiza las propiedades de 4 modelos de tableros tipo sándwich de 2 espesores a partir de madera de balsa (*Ochroma pyramidale*) o fibra de hojas de la piña (*Ananas comosus*) como núcleos junto a la madera de melina (*Gmelina arborea*) como chapas externas. Se evalúa la densidad, contenido de humedad y la absorción de agua e hinchamiento en espesor, los coeficientes de absorción del sonido, reducción del sonido, la conductividad térmica y las propiedades mecánicas de tensión paralela, compresión paralela, cortante al plano y flexión paralela y perpendicular.

Los resultados muestran una densidad de los paneles varía entre 220 a 300 kg/m³, la densidad del núcleo del tablero entre 100 a 160 kg/m³, contenido de humedad fue aproximadamente 12 % y absorción de agua varía de 60 a 127 %. En este estudio las propiedades mecánicas de los tableros de balsa son superiores a los de fibra de piña, siendo la madera de melina la que proporciona la mayor resistencia mecánica. El coeficiente de reducción del sonido (0 a 1) varía entre 0,26 a 0,31, mientras que la conductividad térmica de los modelos utilizados se encuentra entre 0,0539 a 0,1068 W/mK.

Los tableros se categorizan como paneles aislantes de baja densidad seco al aire, tienen buenas cualidades de resistencia mecánica debido a la utilización de chapas de madera, la conductividad térmica de los prototipos es buena para materiales termo aislantes, mientras que su aislamiento acústico presenta valores bajos para ser determinados como materiales aislantes acústicos, aunque este aspecto puede llegar a mejorarse con cambios en las características de los paneles.

Palabras clave: fibra de piña, madera de balsa, propiedades mecánicas, coeficiente de absorción del sonido, coeficiente de reducción del sonido, conductividad térmica.

THERMO-ACOUSTIC SANDWICH PANELS MADE OF BALSA WOOD OR PINEAPPLE FIBER AND MELINA VENEERS, CARTAGO, COSTA RICA

ABSTRACT

Andrés Villalta Céspedes*

Energy efficiency in buildings and the use of renewable materials are of vital importance to mitigate the climate crisis and human health problems. The use of biomaterials such as wood and natural fibers for building insulation is a suitable alternative to reduce the amount of greenhouse gas (GHG) emissions due to anthropogenic activities that cause accelerated climate change.

The present study analyzes the properties of 4 sandwich panel models of 2 thicknesses made from balsa wood (*Ochroma pyramidale*) or pineapple leaf fiber (*Ananas comosus*) as cores together with melina wood (*Gmelina arborea*) as external veneers. Density, moisture content, water absorption and swelling in thickness, sound absorption coefficients, sound reduction, thermal conductivity, and mechanical properties of parallel tension, parallel compression, in-plane shear, parallel and perpendicular bending are evaluated.

The results show the density of the panels varied between 220 to 300 kg/m³, the density of the core board between 100 to 160 kg/m³, moisture content of approximately 12 % and water absorption varies from 60 to 127 %. The mechanical properties of the balsa panels are superior to the pineapple fiber panels, with melina wood providing the highest mechanical resistance. The sound reduction coefficient (0 to 1) obtained values between 0.26 and 0.31, while the thermal conductivity of the models used ranged from 0.0539 to 0.1068 W/mK.

The panels are categorized as air-dry low density insulating panels, they have good mechanical resistance qualities due to the use of wood veneers, the thermal conductivity of the prototypes is good for thermo-insulating materials, while their acoustic insulation

presents low values to be defined as acoustic insulating materials, but they can be improved by conducting changes in the characteristics of the panels.

Key words: pineapple fibers, balsa wood, mechanicals properties, sound absorption coefficient, sound reduction coefficient, thermal conductivity.



Esta obra está bajo licencia [CC BY-NC-ND 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

*Villalta, A. 2024. Tableros termoacústicos tipo sándwich fabricados de madera de balsa o fibra de piña y chapas de melina Cartago, Costa Rica. Tesis de Licenciatura. Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico, Cartago, Costa Rica.

CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE PROYECTO DE GRADUACIÓN

Trabajo final de graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador, integrado por Ph.D. Roger Moya Roque, Ph.D. Freddy Muñoz Acosta y M.Sc. Luis Diego Camacho Cornejo y como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Forestal con énfasis en Manejo y Producción Forestal, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Dorian Carvajal Vanegas M.Sc.
Coordinador trabajo final de
graduación

Roger Moya Roque Ph.D.
Director del trabajo final de
graduación

Freddy Muñoz Acosta Ph.D.
Profesor lector

Diego Camacho Cornejo M.Sc.
Profesor lector



Andrés Villalta Céspedes
Estudiante

Dedicatoria

A mi madre Rocío Céspedes y mi padre Geovanni Villalta por su apoyo y amor incondicional. A mis hermanas Katherinne, Gianna y Sofía por ser mi motivación para seguir adelante.

Agradecimientos

Al profesor Roger Moya por ser mi tutor y un excelente guía en la elaboración de este proyecto.

A mi familia por todo el apoyo.

A los profesores Diego Camacho y Freddy Muñoz por ser lectores del proyecto y por sus invaluable observaciones y recomendaciones.

Al personal del Laboratorio de Biomateriales de la Escuela de Ingeniería Forestal: Didier Tencio, Robert Cubero y Adrián Gutiérrez, por sus importantes consejos y colaboración durante el desarrollo del proyecto.

A la Ing. Alba Sánchez por toda la ayuda e inspiración que me brindó.

Al Profesor Dr. Carsten Mai, Dr. Markus Euring e Ing. Aldo J. Cárdenas Oscanoa Mg. Sc de la Universidad de Göttingen por permitir el uso de los dispositivos: Medidor de flujo de calor HFM 446 M.

A Indorama Ventures Fibers Germany GmbH (Hattersheim, Frankfurt, Alemania) por proporcionar adhesivo PLA.

A mis amigos en la carrera que me ayudaron y motivaron en esta etapa.

Gracias.

ÍNDICE GENERAL

| | | |
|------|--|----|
| 1 | INTRODUCCIÓN | 16 |
| 2 | OBJETIVOS | 20 |
| 2.1 | Objetivo General: | 20 |
| 2.2 | Objetivos específicos: | 20 |
| 3 | MARCO TEÓRICO | 21 |
| 3.1 | Cambio climático..... | 21 |
| 3.2 | Industria de la construcción | 21 |
| 3.3 | Plan de descarbonización o carbono neutralidad | 21 |
| 3.4 | Construcción sostenible y bioconstrucción | 22 |
| 3.5 | Normativas..... | 22 |
| 3.6 | Eficiencia energética | 23 |
| 3.7 | Edificaciones confortables | 23 |
| 3.8 | Materiales convencionales aislantes..... | 23 |
| 3.9 | Materiales renovables aislantes..... | 24 |
| 3.10 | Fibras naturales | 25 |
| 3.11 | <i>Ochroma pyramidale</i> (Balsa) | 25 |
| 3.12 | <i>Ananas comosus</i> (Piña)..... | 26 |
| 3.13 | La industria de la piña | 26 |

| | | |
|-------|--|----|
| 3.14 | Residuos agroindustriales..... | 27 |
| 3.15 | <i>Gmelina arborea</i> (Melina) | 27 |
| 3.16 | Adhesivos | 28 |
| 3.17 | Propiedades físicas y mecánicas..... | 28 |
| 3.18 | Transferencia de calor | 28 |
| 3.19 | Conductividad térmica | 29 |
| 3.20 | Sonido y contaminación sonora..... | 29 |
| 3.21 | Coefficiente de reducción del ruido (NRC) y coeficiente de absorción del ruido (SAC)..... | 30 |
| 4 | MATERIALES Y MÉTODOS | 31 |
| 4.1 | Procedencia del material para el estudio..... | 31 |
| 4.2 | Diseño de los prototipos | 31 |
| 4.3 | Construcción de los tableros de balsa laminada y tableros de fibra de piña... | 33 |
| 4.4 | Disposición de los ensayos en los tableros de madera laminada de balsa y fibra de piña | 36 |
| 4.5 | Propiedades físicas y mecánicas..... | 38 |
| 4.5.1 | Determinación de las propiedades físicas | 38 |
| 4.5.2 | Propiedades mecánicas..... | 39 |
| 4.6 | Propiedades térmicas y acústicas..... | 41 |

| | | |
|-------|--|----|
| 4.6.1 | Aislamiento térmico | 41 |
| 4.6.2 | Aislamiento acústico | 42 |
| 4.7 | Análisis de los datos | 45 |
| 4.7.1 | Estadística de propiedades físicas y mecánicas..... | 45 |
| 4.7.2 | Estadística de propiedades acústicas..... | 45 |
| 5 | RESULTADOS | 46 |
| 5.1 | Propiedades físicas..... | 46 |
| 5.1 | Propiedades mecánicas..... | 48 |
| 5.1.1 | Ensayo de resistencia a la compresión paralela..... | 49 |
| 5.1.2 | Ensayo de resistencia a cortante al plano del tablero..... | 50 |
| 5.1.3 | Ensayo de resistencia a la tensión paralela..... | 51 |
| 5.1.4 | Ensayo de flexión perpendicular a la dirección principal del tablero | 52 |
| 5.1.5 | Ensayo de flexión paralela al grano del tablero | 53 |
| 5.2 | Propiedades acústicas | 55 |
| 5.2.1 | Datos acústicos registrados..... | 55 |
| 5.2.2 | Coeficientes de absorción y reducción del sonido | 55 |
| 5.3 | Propiedades térmicas | 58 |
| 6 | DISCUSIÓN | 59 |
| 6.1 | Análisis físico | 59 |

| | | |
|-----|--------------------------|----|
| 6.2 | Análisis mecánico | 61 |
| 6.3 | Aislación acústica | 65 |
| 6.4 | Aislamiento térmico..... | 66 |
| 7 | CONCLUSIONES | 68 |
| | RECOMENDACIONES | 69 |
| 8 | REFERENCIAS..... | 70 |
| 9 | ANEXOS | 81 |

ÍNDICE DE CUADROS

| | | |
|-----------|--|----|
| Cuadro 1. | Configuración de los distintos prototipos de tableros aislantes termoacústicos tipo sándwich de baja densidad a base de madera de balsa y fibra de piña..... | 33 |
| Cuadro 2. | Propiedades físicas obtenidas para cada diseño evaluado..... | 46 |
| Cuadro 3. | Propiedades mecánicas de los tableros a partir de madera laminada de balsa y fibra de piña..... | 49 |
| Cuadro 4. | Valores SAC para las frecuencias 250, 500,1000, 2000 Hz y NRC..... | 57 |
| Cuadro 5. | Valores de las probetas para ensayos térmicos. | 58 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Conformación del tablero de 3 capas..... | 32 |
| Figura 2. Paneles de madera laminada de balsa (izquierda) y paneles de fibra de piña (derecha) utilizados como almas de los tableros. | 34 |
| Figura 3. Resultados de los tableros de 3 capas con alma de fibra de piña (izquierda) y madera de balsa (derecha). | 35 |
| Figura 4. Distribución de probetas para los ensayos de propiedades físicas y mecánicas de los tableros a base de madera de balsa y fibra de piña. Distribución para tablero con espesor de 12,7 mm (izquierda), distribución para tableros de espesor 19,1 mm (derecha)..... | 37 |
| Figura 5. Disposición de los instrumentos para la realización del ensayo acústico a las muestras de tableros. Fuente: (Atahuachi & Carcausto, 2018)..... | 43 |
| Figura 6. Cajón de insonorización (izquierda) y cámara de insonorización (derecha) utilizadas en los ensayos acústicos. Agradecimientos a HdM por el préstamo de la cámara de insonorización. | 43 |
| Figura 7. Promedios de la densidad total del tablero y la densidad del alma para cada diseño..... | 47 |
| Figura 8. Porcentaje de absorción de agua para cada tablero y el hinchamiento obtenido en el espesor por parte de los tableros de fibra de piña y madera laminada de balsa.. | 48 |
| Figura 9. Resistencia a la compresión paralela respecto al número de espesor utilizados para la probeta. | 50 |

| | |
|--|----|
| Figura 10. Resistencia a fuerza cortante que soportan las almas o capa interior de los prototipos con respecto a la dureza de los dos materiales utilizados..... | 51 |
| Figura 11. Promedio de resistencia a la tensión paralela en semejanza con el área del cuello de la probeta para cada prototipo. | 52 |
| Figura 12. Módulo de ruptura (MOR) de la flexión perpendicular a la fibra. | 53 |
| Figura 13. Módulo de elasticidad (MOE) para la flexión perpendicular a la orientación de la fibra de los tableros. | 53 |
| Figura 14. Módulo de ruptura (MOR) para la flexión paralela de los tableros estudiados. | 54 |
| Figura 15. Módulo de elasticidad (MOE) para la flexión paralela a la orientación de la fibra de los tableros. | 54 |
| Figura 16. Promedio de los valores para cada uno de los prototipos en las distintas frecuencias de onda evaluadas..... | 55 |
| Figura 17. Coeficientes de absorción del sonido (SAC) de los prototipos para cada frecuencia analizada. | 56 |
| Figura 18. Curva de absorción del sonido (SAC) de los prototipos hasta los 2000 Hz. | 56 |
| Figura 19. Coeficientes de reducción del sonido obtenidos para cada prototipo evaluado. | 57 |
| Figura 20. Resultados del ensayo de conductividad térmica para los prototipos estudiados..... | 58 |

ÍNDICE DE ANEXOS

| | |
|--|----|
| Anexo 1. Grafica de temperaturas durante el ensayo de conductividad térmica al prototipo de fibra de piña de menor espesor (FD)..... | 81 |
| Anexo 2. Grafica de temperaturas durante el ensayo de conductividad térmica al prototipo de fibra de piña de mayor espesor (FG)..... | 81 |
| Anexo 3. Grafica de temperaturas durante el ensayo de conductividad térmica al prototipo de madera laminada de balsa de menor espesor (MD). | 82 |
| Anexo 4. Grafica de temperaturas durante el ensayo de conductividad térmica al prototipo de madera laminada de balsa con mayor espesor (MG)..... | 82 |

1 INTRODUCCIÓN

Las actividades antropogénicas como el transporte, la ganadería y agricultura extensiva, las industrias, la explotación de recursos naturales o el acondicionamiento de las edificaciones son causantes de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Estos gases se acumulan en la atmósfera y tienen efectos nocivos sobre la salud humana y el bienestar de los ecosistemas. Entre el año 2010 y 2019 estas emisiones de origen antropogénico han aumentado en un 12 % y su aumento se atribuye a las zonas urbanas (IPCC, 2022). Los GEI propician una mayor retención de la radiación solar dentro de la atmósfera, la cual provoca el calentamiento global del planeta y otras consecuencias del cambio climático generando graves preocupaciones sobre el bienestar de las personas y del medio ambiente (Rodríguez & Meza, 2018).

La industria de la construcción es uno de los grandes responsables del consumo energético a escala mundial. Las edificaciones tienen una alta incidencia en las emisiones de carbono representando un 40 % del total de la demanda energética final en Europa (Rivero, 2016). Las ciudades pueden desempeñar un papel positivo en la reducción de las emisiones GEI a través de códigos de construcción y la elección de materiales alternativos de construcción (IPCC, 2022). (Muhammad et al, 2024; Martínez, 2021). El uso de materiales de fuentes renovables se vuelve atractivo para la demanda de materiales ingenieriles, para sustentar el ambiente y disminuir el consumo de materiales sintéticos a base de petróleo y de fuentes agotables con altos requerimientos energéticos en la construcción (Galos et al., 2022).

Aunque las interacciones entre el clima y la atmósfera generan varias amenazas, es fundamental destacar los impactos negativos que causan sobre la salud humana. Una gran cantidad de estudios ha destacado los impactos negativos sobre la salud humana y las vulnerabilidades asociadas (Monteiro et al., 2022). Los escenarios globales proyectan que los edificios existentes, si se rehabilitan, junto con los edificios que aún están por construir, generarían cerca de cero emisiones GEI en 2050 si se eliminan las barreras a la descarbonización y se implementan de manera efectiva los paquetes de políticas que combinan medidas ambiciosas de suficiencia, eficiencia energética y

energía renovable (IPCC, 2022). En este sentido, la repercusión que tiene el aislamiento térmico y acústico de las edificaciones es clave para la descarbonización, ya que ayudan a la adaptación de las áreas urbanas, al aumento de la eficiencia energética de las ciudades y la conservación de la energía, a mitigar las emisiones GEI, a disminuir los riesgos climáticos y reducir las vulnerabilidades a la salud y comodidad de las personas (IPCC, 2022).

Los tableros tipo sándwich son uno de los tipos de materiales compuestos más utilizados en la industria de la construcción. Son estructuras de desarrollo de ingeniería compuestas, ligeras y multifuncionales, construidas mediante la inserción de un núcleo de baja densidad entre dos revestimientos delgados y rígidos (Feng et al., 2020). Son productos que ofrecen alternativas para promover el desarrollo de la industria maderera con nuevos productos y diferentes aplicaciones (Zambrano et al., 2013). Estos productos ingenieriles se conforman de dos capas exteriores usualmente metales o materiales rígidos separadas por un material central, generalmente espumas, paneles, estructuras celulares o materiales ligeros como la madera para ser utilizado como alma o núcleo en la construcción (Patel et al., 2024)

Los materiales compuestos como los tableros tipo sándwich son conocidos por sus propiedades altamente personalizables a las necesidades del sistema de ingeniería en el cual se utilicen, ya que es relativamente sencillo modificar sus características. Los materiales compuestos son usados en diversas disciplinas de la ingeniería, entre ellas la industria marina, la construcción, la fabricación de electrodomésticos y la tecnología espacial (Tüfekci et al., 2023). Los cambios de temperaturas en las edificaciones tienen una influencia negativa en la calidad de vida, el confort térmico y la productividad de los ciudadanos, además de aumentar los requisitos de energía, como el consumo de electricidad y agua (Mahdi, 2024). De aquí la relevancia de buenas propiedades térmicas de los materiales de construcción utilizados en las áreas edificadas. La madera ha sido ampliamente utilizada como almacenamiento de energía en edificios gracias a sus ventajas de ser renovable, fácil de cambiar, poseer alta resistencia mecánica, confort

térmico, capacidad de absorber ondas sonoras, resistencia al fuego y adecuada prevención a la condensación de vapor (Mahdi, 2024; Muhammad et al., 2024).

Dentro de las maderas utilizadas se encuentra la especie *Ochroma pyramidale* (balsa) que es una especie atractiva entre los materiales sostenibles para construir tableros tipo sándwich debido a las propiedades mecánicas altas en relación con su densidad, que la hacen atractiva para núcleos de estos paneles (Borrega & Gibson, 2015; Tüfekci et al., 2023).

La balsa es una especie autóctona de zonas tropicales de América que ha tenido alta demanda en el sector forestal durante los últimos años de mercados internacionales como China y Europa (Sánchez et al., 2023). Ecuador, es el principal productor de madera de balsa del mundo y en los últimos 5 años su producción ha experimentado una conducta de ascenso debido a la creciente necesidad de fuentes de materiales renovables (Sánchez et al., 2023). La balsa es de las maderas comerciales más livianas, con densidades de 60 hasta 380 kg/m³. Contemplando esa característica junto con el rápido crecimiento de la especie, sus buenas propiedades mecánicas en relación con el peso y sus características como material aislante, convierten a la madera de balsa en un material con una amplia variedad de aplicaciones (Tüfekci et al., 2023; Zhao et al., 2024; Apuy, 2021).

Por otra parte, Costa Rica es el principal exportador de piña fresca a nivel mundial, convirtiendo a este sector en una gran fuente de empleo e ingresos para el país (Rodríguez & Prunier, 2020). No obstante, el sector también afronta un gran reto relacionado al impacto ambiental causado por su producción y el manejo de los residuos orgánicos (Vargas et al., 2018). La piña es de los cultivos que mayor cantidad de residuos genera tras la cosecha, ya que representan más del 50 % del peso de la planta (Do et al., 2021). Por lo tanto, existe una abundante disponibilidad del rastrojo de la piña como materia prima que puede ser implementado en nuevas tecnologías y ayudar a la economía circular al aprovechar los residuos de la industria piñera (Infante, 2017).

Comúnmente los aislamientos están fabricados de poliuretanos que provienen de productos derivados del petróleo, generando emisiones atmosféricas contaminantes

como producto de los procesos de combustión de los combustibles fósiles, tales como dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, dióxido de carbono y material particulado. Estas emisiones provocan efectos perjudiciales para la salud humana tal como infecciones y problemas respiratorios (Acuña; 2021; Porras et al., 2012). Actualmente existe una demanda creciente por nuevos materiales de construcción con un menor consumo energético en sus procesos de producción, que sean menos dañinos para el medio ambiente y que estén fabricados con materias primas renovables (Martins et al., 2023). Por lo que la implementación de paneles aislantes a base de materiales renovables en la industria de la construcción evitaría el uso de materiales que implican riesgos para la salud humana y que requieren de un gran consumo de energía en su extracción y producción, tales como el cemento y los materiales aislantes sintéticos derivados del petróleo (Martínez, 2021).

Por tanto, se plantea la pregunta sobre la viabilidad técnica de la utilización de la madera de balsa y fibra de piña en la fabricación de paneles aislantes termoacústicos de baja densidad, que permitan ser implementados en diversidad de sistemas con el propósito de mejorar la eficiencia energética, las condiciones de los espacios y disminuir los consumos energéticos contribuyendo a la mitigación del cambio climático. Y es así como el presente proyecto tiene el objetivo de evaluar distintos tipos de tableros aislantes termoacústicos de baja densidad a base de fibra de piña y madera de balsa que puedan ser aplicados para la regulación de la temperatura y la reflexión del sonido tanto en áreas urbanas como en el sector industrial.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo General:

Fabricar y evaluar tableros aislantes termoacústicos de 3 capas tipo sándwich de 12 mm y 19 mm de baja densidad construido con madera de *Ochroma pyramidale* (balsa) o fibra de *Ananas comosus* (piña) y chapa de *Gmelina arborea* (melina), que proporcione regulación de la temperatura y la disminución del ruido tanto para el sector urbano como en el industrial.

2.2 Objetivos específicos:

Determinar las propiedades físicas y mecánicas de los tableros de 3 capas a base de madera de balsa o fibra de piña y chapa de melina.

Caracterizar las propiedades térmicas y acústicas de los tableros a base de madera de melina, madera de balsa y fibra de piña para la definición de las especificaciones técnicas del producto.

3 MARCO TEÓRICO

3.1 Cambio climático

Las actividades humanas como el transporte en automóviles, el acondicionamiento de los edificios, la industria y las actividades agrícolas y pecuarias emiten al medio ambiente GEI principalmente vapor de agua, dióxido de carbono (CO₂), metano, óxidos de nitrógeno, ozono, clorofluorocarbonos (CFC) e hidrofluorocarbonos (HFC). Estos gases se acumulan en la atmósfera, absorben radiación, aceleran el calentamiento global y provocan efectos nocivos para el medio ambiente y la salud humana. (Rodríguez & Meza, 2018). La concienciación acerca del cambio climático está causando un impulso hacia un reemplazo de los materiales utilizados en la construcción y la eficiencia energética de los edificios (Vehola et al, 2022).

3.2 Industria de la construcción

Se estima que sobre el sector de construcción recae casi la mitad de los recursos naturales, un 40 % del consumo energético global, un 12 % del consumo de agua potable global y un 38 % de las emisiones globales de GEI (USAID, 2013 citado en Rodríguez & Meza, 2018). Las edificaciones son responsables del 40 % del total de energía consumida, 35 % de los GEI emitidos, 50 % de la utilización de materiales extraídos y 30 % del consumo del recurso hídrico en la Unión Europea (UE) (Vehola et al, 2022). La industria de la construcción es responsable de más del 50 % de las emisiones de carbono de Reino Unido. (Lawrence, 2015).

3.3 Plan de descarbonización o carbono neutralidad

La construcción sostenible surge como opción para disminuir la emisión de GEI al usar más eficientemente los recursos y la energía, promoviendo al mismo tiempo la innovación en el sector de materiales ecológicos de construcción. El plan de carbono neutralidad busca la mejora de la eficiencia energética y la huella de los materiales de construcción (Vehola et al., 2022).

3.4 Construcción sostenible y bioconstrucción

La construcción sostenible se fundamenta en los principios de reducir, reutilizar, reciclar, eliminar materiales tóxicos, proteger la naturaleza, disminuir los costos del ciclo de vida y asegurar la calidad de las edificaciones (Rodríguez & Meza, 2018). El análisis de ciclo de vida (ACV) de los materiales es una herramienta ligada a la bioconstrucción que permite el estudio de la repercusión ambiental de materiales y sus soluciones constructivas. Se evalúa los distintos procesos a los que se someten los materiales como producción, transporte, utilización y se establecen indicadores que penalizan al material dependiendo de su consumo energético, efecto invernadero, residuos creados. La bioconstrucción se basa en el uso de materiales sostenibles y la sustitución de materiales de alto consumo por materiales como la madera y productos renovables como una estrategia para disminuir el carbono que almacenan los edificios (Velázquez, 2016).

3.5 Normativas

La intención de encontrar materiales resistentes que aporten comodidad y confortabilidad ha aumentado el uso de refuerzos como fibras naturales y sintéticas. (Nicolalde, 2018). Según el acuerdo de París del 2015, se fija el objetivo de limitar el aumento de temperaturas globales a través de una rápida reducción de emisiones de GEI. La UE se propone objetivos como el aumento del 32 % en energías renovables en el consumo final de energía, la reducción del 40 % de emisiones de GEI sobre los niveles de 1990 y un 32,5 % de ganancia en eficiencia energética hasta el 2030 (Rodríguez, 2019).

En el caso de Costa Rica el plan de descarbonización contempla una variedad de ejes relacionados con la disminución de las emisiones GEI. Entre ellos se encuentra la implementación de prácticas de construcción más sostenible de edificaciones e infraestructuras, el fortalecimiento de normas, estándares e incentivos para la implementación de prácticas de construcción sostenible y el mejoramiento de operación de las edificaciones. Para lograr cumplir con las metas propuestas para 2050 el plan también propone la disminución de residuos, con políticas que promuevan una mejor gestión de los residuos en el sector residencial e industrial y el desarrollo de nuevas

tecnologías y productos, así como el uso eficiente de la energía son parte fundamental para la descarbonización (Gobierno de Costa Rica, 2018).

3.6 Eficiencia energética

Uno de los principales problemas ambientales es la ineficiencia en el uso de los recursos naturales. Se interpreta el aislamiento térmico como un método de ahorro de energía y de mayor beneficio, teniendo una fuerte repercusión en la sociedad en términos económicos y medioambientales (Atahuachi y Carcausto, 2018). Un edificio bien aislado térmicamente consume menor energía, ya que conserva una temperatura estable en su interior y por lo tanto contribuye a la disminución de las emisiones de GEI, ya que reduce la necesidad de uso de calderas y aire acondicionado (Velázquez, 2016).

3.7 Edificaciones confortables

El ser humano utiliza los recursos naturales para afrontar diversas condiciones climatológicas y así crear un ambiente de confort. Para una buena salud física y mental de los habitantes se debe de contemplar una alta calidad de confort en los espacios interiores (Ángulo, 2021). El confort se asocia a lo que el ser humano percibe del entorno a través de los sentidos como lo higrotérmico, visual, acústico y olfativo. Que un espacio sea confortable tiene grandes consecuencias en la funcionalidad, temperaturas adecuadas son necesarias para el confort y se debe de garantizar sin tener que invertir grandes cantidades de energía para el acondicionamiento térmico de las edificaciones como sucede en la actualidad (Secretaría distrital de ambiente, hábitat y planeación, 2015).

3.8 Materiales convencionales aislantes

Los materiales aislantes ofrecen un alto porcentaje de resistencia a la transmisión de calor y poseen un alto coeficiente de absorción del sonido. También se exigen propiedades complementarias como resistencia mecánica, no corrosivas, resistencia a la humedad, oxidación y un buen acabado (Martínez, 2021). La industrialización ha aportado tecnologías y productos económicamente eficientes al sector de la construcción

a partir de materiales agotables como ladrillos, acero, hormigón, plásticos producidos en masa. Teniendo una producción barata del material, sin embargo, presentan un alto costo energético de extracción, transporte y transformación (Lawrence, 2015).

Existen diferentes materiales aislantes que pueden aumentar la eficiencia energética de las construcciones y edificaciones. En el mercado alemán, los materiales fósiles tienen una cuota del 48 %, mientras que los materiales minerales la tienen del 45 % y los materiales aislantes renovables (de base biológica) representan solo el 7 %. De este porcentaje, 51 % corresponde a las fibras de madera, 41 % celulosa, 5 % el cáñamo y otras fuentes de biomasa constatan un 2 %. Los materiales aislantes a partir de materiales no renovables, como el poliestireno expandido (EPS), contribuyen a la aceleración del calentamiento global y cambio climático a través de sus procesos de producción que requieren altas cantidades de energía (Schulte et al., 2021). El uso de estos materiales genera reacciones adversas ya que afecta la calidad de vida de las personas y muchos ecosistemas (Martínez, 2021).

3.9 Materiales renovables aislantes

Los materiales lignocelulósicos dominan la mayoría de los ecosistemas naturales, constituidos por biopolímeros como la celulosa, hemicelulosa y lignina, son empleados para elaborar muchos productos en el sector industrial (Nicolalde, 2018). Los materiales renovables viables para la construcción deben poder reproducirse de manera sostenible en periodos cortos de tiempo, esencialmente de materiales biológicos provenientes de animales o plantas. Los materiales aislantes de origen biológico tienen menos energía incorporada que las alternativas convencionales no renovables, aparte de que para su fabricación adicionalmente capturan CO₂ atmosférico. Además, no son irritantes, por lo cual son de fácil manipulación, brindan mayores aplicaciones y al desecharse su contaminación es menor al ser biodegradables o incluso pueden llegar a ser reutilizados en otros procesos (Lawrence, 2015). La aplicación de materiales aislantes biológicos son una manera de disminuir la carga climática al almacenar CO₂ y contribuir menos GEI en su producción (Schulte et al., 2021). Los árboles durante su crecimiento tienen una acumulación evidente de biomasa, siendo uno de los servicios ambientales más

importantes ya que permite el secuestro de carbono atmosférico. Los materiales aislantes mejor calificados son materiales porosos o fibrosos, característica que provoca que en su interior existan espacios o celdas que generalmente atrapan el aire (Atahuachi & Carcausto, 2018).

3.10 Fibras naturales

Las fibras naturales son utilizadas para producir compuestos reforzados. Estas fibras presentan una densidad baja en comparación con las fibras de vidrio y carbono, además son totalmente degradables y renovables. (Kotteesvaran et al., 2024; Sharma et al., 2020) Las fibras naturales tienen las siguientes características: baja densidad y costo, son productos biodegradables y reciclables, presentan neutralidad de CO₂, y son de fácil fabricación y procesamiento (Chandrasekar et al., 2022).

3.11 *Ochroma pyramidale* (Balsa)

La balsa originaria de América presenta una extensión desde el sur de México hasta Perú y Ecuador. Es una especie que presenta un rápido crecimiento con ciclos de 5 a 8 años, que alcanza más de 20 m de altura y 75 cm en el diámetro a la altura del pecho (Sánchez et al., 2023). Vahedi et al., (2020) indican que, debido a su baja densidad, relación de rigidez y resistencia al peso, la madera de balsa es un material importante en el desarrollo de estructuras. Crece en lugares donde la temperatura varía de 23 a 27 °C, precipitaciones de 1300 a 1500 mm anuales preferiblemente y su crecimiento óptimo se da en suelos húmedos arenosos, margosos o arcillosos, pero con condiciones buenas de luz y aireación (Martínez y Almeida, 2017). Es considerada una de las maderas más livianas del mundo. Según la edad y el hábitat de desarrollo su densidad varía dentro del rango de 40 a 380 kg/m³, además de sus destacadas características de absorción de energía que se derivan de su relativamente baja densidad y porosidad, propiedades que hacen de la madera de balsa uno de los materiales más atractivos para el uso como núcleos en estructura tipo sándwich (Tüfekci et al., 2023; Moncayo et al., 2018). Se prevé un aumento en las aplicaciones de la madera de balsa, debido a que los materiales naturales y biodegradables son cada vez más importantes para la sostenibilidad

medioambiental. Por lo que, la utilización de balsa es importante para reducir el énfasis en los materiales sintéticos de base orgánica fabricados con productos derivados del petróleo y de minerales de fuentes agotables con un gran requerimiento de energía para su producción (Galos et al., 2022).

3.12 *Ananas comosus* (Piña)

De la familia Bromeliaceae, la planta de piña (*Ananas comosus*) es una planta herbácea de 0,75 a 1,5 m de altura, tiene hojas largas de entre 50 y 180 cm de largo con espinas puntiagudas en los bordes, normalmente tardan 12 a 14 meses en florecer y 6 a 8 para que el fruto madure. Generalmente se obtiene de 30 a 50 hojas por planta de piña, resultando en 1 a 1,5 kg de hojas que se desechan después del cultivo (Sibaly & Jeetah, 2017). El ciclo fenológico consta de 5 fases: crecimiento vegetativo, inducción floral, floración, desarrollo de fruto y maduración de la planta, además de ser un cultivo con una gran demanda de nutrientes a lo largo del ciclo y un mantenimiento intensivo contra malezas, plagas y enfermedades (Vargas et al., 2018).

3.13 La industria de la piña

Los países con mayor producción de esta fruta son Tailandia, Costa Rica, Brasil, Filipinas e Indonesia. La superficie total de cultivo se estima en 1,02 millones de hectáreas (Zhang et al., 2016). Como lo menciona PROCOMER (2015) en el estudio de Vargas et al. (2018), Costa Rica es el principal exportador de piña fresca a nivel mundial y está categorizada como la mejor del mundo. La actividad reporta ganancias anuales de 900 millones de dólares según cifras del año 2017 de la cámara nacional de productores y exportadores de piña en Costa Rica (Canapep). Se estima de 45000 a 58000 hectáreas destinadas a la actividad piñera (Rodríguez & Prunier, 2020).

Por cada hectárea de cultivo de piña cosechada quedan entre 200 y 250 toneladas de material verde o rastrojo que actualmente no tienen uso comercial. Una sola planta de piña puede producir alrededor de 100 g de fibra (Moya y Camacho, 2014). En comparación con las fibras obtenidas de derivados del petróleo estas fibras lignocelulósicas a partir de las hojas de piña presentan una densidad menor, cuestan

menos para producir, consumen menos energía durante la producción, crean una abrasión baja en la maquinaria, carecen de riesgos para la salud cuando se inhalan, son renovables y biodegradables, y son fibras neutras en CO₂ (Infante, 2017). Por lo cual, utilizar los residuos que en su mayoría presentan características óptimas para su aprovechamiento en cadena alternativas de producción y obtener nuevos compuestos y productos con un valor agregado permite ampliar las posibilidades de la industria y disminuir los desechos (Cury et al., 2017).

3.14 Residuos agroindustriales

Los residuos agroindustriales compuestos principalmente de materia orgánica se generan en grandes cantidades, y representan un gran problema ambiental (Farias et al., 2017). En Costa Rica la industrialización de los productos agrícolas genera un 86 % del total de desechos de los sectores industriales, los cuales representan recursos naturales no utilizados y en algunos casos crean serios problemas de disposición, de ahí que se busquen alternativas para convertirlos en productos útiles. Los materiales agrícolas y los productos forestales generalmente llegan a producir entre un 30 y un 40 % de materiales de desecho, que pueden utilizarse en el procesamiento de materiales con valor añadido (Infante, 2017). La piña es el producto que más residuos agroindustriales genera (Moya et al., 2023).

3.15 *Gmelina arborea* (Melina)

Perteneciente a la familia Lamiaceae la melina es de las especies más utilizadas para la reforestación en zonas tropicales ya que presenta un rápido crecimiento, adaptabilidad a diversidad de condiciones climáticas y amplia versatilidad de usos de su madera (Rojas et al., 2004). En Costa Rica se ha utilizado para reforestar prácticamente desde el inicio del desarrollo del sector forestal del país y su madera se implementa en varias industrias, principalmente como material de embalaje (Hernández, et al., 2021; Martínez, 2015). Junto con la reforestación surge los programas de mejoramiento genético en el país, que buscan obtener cambios notables en las características y la conducta de la melina, como en la forma y altura de fuste, turnos de aprovechamiento más reducidos, madera más

uniforme y de mayor calidad, con el fin de poder implementarla en más productos con mayor valor agregado (Quirós, 2015).

3.16 Adhesivos

Los adhesivos o líneas de cola son de vital importancia en la construcción de tableros. El acetato de polivinilo (PVA) es un adhesivo con varias ventajas entre ellas buenas propiedades mecánicas y térmicas, biodegradable, con alta biocompatibilidad y con muchas aplicaciones. El adhesivo PVA es un producto obtenido mediante la polimerización en medio acuoso del acetato de vinilo o “cola blanca”, es muy resistente mecánicamente en ambiente seco, aunque muy rígido y poco resistente en entornos húmedos, y es ampliamente usado en la producción de paneles (Bardak et al., 2017; Rojas et al., 2020). El ácido poliláctico (PLA) es un polímero biodegradable, de base biológica y biocompatible con el potencial de sustituir a derivados del petróleo en la fabricación de fibras. El PLA se deriva del ácido láctico, el cual es un ácido orgánico natural producido mediante la fermentación de azúcares obtenidos a partir de recursos renovables (Campozano y Riera, 2022).

3.17 Propiedades físicas y mecánicas

Las maderas en general son consideradas materiales anisotrópicos que varían sus propiedades mecánicas dependiendo del eje en el que sean medidos (Martínez y Almeida, 2017). Las propiedades físicas tienen un papel muy importante, pues contemplan la relación entre la madera y la presencia del agua, que es un constituyente de los árboles (Moya y Tenorio, 2020). Las propiedades físicas y mecánicas de tableros dependen de las relaciones entre la materia prima, como la madera utilizada, el proceso de manufactura y del uso final que se le vaya a dar al producto. (Tenorio et al., 2012)

3.18 Transferencia de calor

La transferencia de calor entre dos objetos puede ocurrir por radiación, a través de ondas electromagnéticas; por convección, a través de fluidos como el aire; y por conducción, cuando los cuerpos están en contacto directo. La función del aislante térmico es disminuir

la transmisión de calor a través de la estructura o componente para lograr espacios con un mayor equilibrio de condiciones (Cruz, 2022, S&P, 2018).

3.19 Conductividad térmica

La capacidad de un material para conducir el calor se conoce como conductividad térmica. Esta propiedad determina la eficacia con la que el calor puede transferirse en el material. Los materiales termoaislantes suelen estar hechos de fibras minerales, como la lana de vidrio o la lana de roca, y se utilizan ampliamente en diversos campos. En la actualidad, varios estudios utilizan fibras lignocelulósicas para sustituir el uso extendido de estas fibras de origen mineral (Cárdenas et al., 2024). Un material se categoriza como aislante térmico cuando tiene un coeficiente de conductividad térmica menor a 0,060 W/mK (Cruz, 2022). Este valor es de importancia en el diseño y la simulación de cargas térmicas en edificios, sistemas que utilizan energía, en la optimización de componentes en las plantas de procesos industriales y en particular de equipos que involucran transferencia de calor por conducción (Lira et al., 2008).

3.20 Sonido y contaminación sonora

El sonido es la perturbación creada por una fuente al vibrar, lo que genera un cambio de presión que se transmite por un medio en forma de ondas. La capacidad del oído humano para percibir sonidos es de los 20 - 20000 Hz. Se define la acústica como la ciencia que trata los comportamientos del sonido durante su producción, transmisión y percepción. Las ondas sonoras se generan cuando las oscilaciones se convierten en un tipo de onda a través de un medio, en este caso el aire (Criado y Franco, 2019; Martínez, 2023). En el sector industrial se generan fuentes de ruido elevadas en las etapas de producción, lo cual perjudica al personal que está sometido a una constante exposición. Por lo tanto, la implementación de estrategias para disminuir el riesgo auditivo y prevenir accidentes y/o enfermedades profesionales es de alta relevancia (Díaz, 2023).

3.21 Coeficiente de reducción del ruido (NRC) y coeficiente de absorción del ruido (SAC)

Para el manejo de la propagación del sonido se aplican métodos de absorción, reflexión y difusión para crear un equilibrio dentro y fuera de la sala. La reflexión sonora se da cuando una onda se enfrenta a una superficie y cambia su dirección (Criado y Franco, 2019). En el mercado existen muchos materiales acústicos tanto de procedencia natural como sintética. Entre los sintéticos los más conocidos son la fibra de vidrio, la espuma de poliuretano o fono absorbente. Entre los materiales aislantes acústicos de procedencia natural, se encuentran las fibras de origen vegetal, como el yute, el cáñamo, y los aglomerados naturales, el corcho o la misma lámina de madera. Es posible lograr que la fibra natural se convierta en una materia prima, resistente y con cualidades ecológicas que pueda ser incluido como elemento constructivo para obtener un sonido de calidad (Espejo, 2019, Ángulo, 2021). Un material presenta buena absorción cuando su valor SAC supera los 0,35; y es considerado como buen reductor de sonido cuando el valor NRC supera los 0,45 (Mat et al., 2023a).

4 MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Procedencia del material para el estudio

Para el presente estudio y la confección de los distintos prototipos de tableros tipo sándwich se trabajó con madera de *Ochroma pyramidale* (balsa), obtenida de plantaciones forestales establecidas en Guácimo de Limón, Costa Rica. Esta zona presenta un promedio altitudinal de 114 m.s.n.m, una temperatura media de 27 °C y una precipitación media anual de 1409 mm (Weather Spark, 2016a). Las plantaciones poseen una edad de 31 meses desde su establecimiento hasta su cosecha, la densidad de siembra utilizada fue de 2,5 x 2,5 m, al momento del aprovechamiento los árboles presentaron un diámetro promedio de 14,30 cm medido a 1,3 m desde el suelo, altura total de 12,31 m y una altura comercial promedio de 4,63 m. En el proceso de obtención de la madera aserrada se utilizó un patrón de corte típico para diámetros menores, en el cual se obtiene madera con dimensiones de 7,5 cm de ancho y 5 cm de espesor en todo el largo de la troza (Moya, 2007).

Además, se utilizaron las hojas o rastrojo de la planta de *Ananas comosus* (piña), obtenidas de monocultivos ubicados en la comunidad de Pinar en el distrito de Pital de San Carlos, perteneciente a la región norte del país. En este distrito la temperatura varía de 23 a 33 °C, siendo 27 °C la media durante el año. Se encuentra a una elevación promedio de 156 m.s.n.m y una precipitación media anual de 974 mm. (Weather Spark, 2016b). Previamente y para la confección de fibras se usó el modelo productivo de obtención de fibras naturales a partir de piña descrito por Moya & Camacho (2014).

4.2 Diseño de los prototipos

Se fabricaron 4 prototipos de tablero tipo sándwich de tres capas, donde el núcleo del tablero es considerado la variable entre los prototipos, tanto en el material de composición como en el espesor de esta. Los materiales utilizados para la capa central corresponden a un panel de fibra de piña cortada aproximadamente a 2 cm de largo y un

panel de madera laminada de balsa. Los espesores del material para el alma, tanto de la fibra de piña como balsa fueron de 6,7 a 13,1 mm. A los prototipos se les colocó una capa por ambos lados correspondiente a madera de melina (*Gmelina arborea*) de 3 mm de espesor secada a un contenido de humedad del 6 al 8 % para mejorar la estética y permeabilidad de los tableros (Figura 1). Así se lograron dos espesores de tableros de 12,7 mm y 19,1 mm con dimensiones de 600 mm de ancho y 600 mm de largo. La figura 1 muestra el diseño de los prototipos descrito anteriormente.

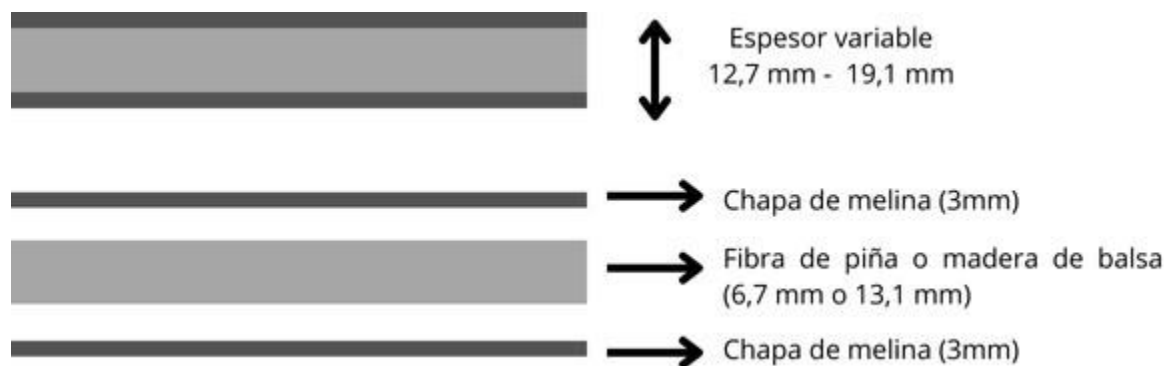


Figura 1. Conformación del tablero de 3 capas.

En total se realizaron 20 tableros con distintas configuraciones (ver Cuadro 1), por cada diseño se construyeron 5 repeticiones para presentar confiabilidad en los valores obtenidos. En la estadística el número mínimo de repeticiones no debería de ser menor a 4 para obtener confiabilidad en los resultados del experimento (Dicovski, 2010). El adhesivo que se implementó en la construcción de los tableros es PLA para la fabricación del panel de fibra de piña y PVA para la realización del panel de madera de balsa y el encolado de la chapa con el alma de balsa o fibra de piña.

Cuadro 1. Configuración de los distintos prototipos de tableros aislantes termoacústicos tipo sándwich de baja densidad a base de madera de balsa y fibra de piña.

| Material de alma | Prototipo y codificación | Espesor del alma del tablero (mm) | Chapa de cubierta (mm/cada chapa) | Espesor total del tablero (mm) | Cantidad de tableros |
|--------------------------|--------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|----------------------|
| Madera laminada de balsa | MD | 6,7 | 3 | 12,7 | 5 |
| Fibra de piña | MG | 13,1 | 3 | 19,1 | 5 |
| | FD | 6,7 | 3 | 12,7 | 5 |
| | FG | 13,1 | 3 | 19,1 | 5 |

Nota: La primera letra de la codificación corresponde al material del núcleo (Madera o Fibra), mientras que la segunda corresponde al espesor (Grueso o Delgado).

4.3 Construcción de los tableros de balsa laminada y tableros de fibra de piña

El reaserrío y la producción de paneles laminados de la madera de balsa se realizaron en el Laboratorio de Biomateriales de la Escuela de Ingeniería Forestal. Aquí se seleccionó la madera a utilizar y se procedió a obtener reglas de 5x5 cm en ancho y espesor, posteriormente, utilizando el adhesivo PVA Grip Bond 2 marca Lanco, (el cual su ficha técnica y especificaciones se revisaron en www.lancopaints.com (Lanco, 2016a)) se realizó el laminado de la madera y se obtuvo un único bloque laminado de 60x60 cm de ancho y largo, con aproximadamente 50 cm de espesor. El bloque se colocó en un aserradero portátil para obtener los paneles laminados de balsa de 10 y 20 mm de espesor los cuales fueron lijados en una calibradora SCM Sandya 1 plapara madera hasta llegar a los espesores deseados (ver la figura 2).

Por su parte las fibras de la piña fueron sometidas a un proceso de peinado con el fin de descartar impurezas en las fibras y cortadas a 2 a 3 cm aproximadamente para obtener un mejor mezclado de la fibra con el adhesivo PLA. Para la realización de los paneles se

calculó los volúmenes que ocuparía la fibra de 4716 y 2412 cm³ según los espesores de 13,1 y 6,7 mm respectivamente. También se estimó la densidad deseada que deberían de tener los paneles, la cual correspondió a 100 kg/m³. Con estos datos se logró calcular la masa de fibra de piña pertinente para la construcción de cada panel siendo de 471,2 gramos para el espesor de 13,1 mm y 241,2 g para el espesor de 6,7 mm.

La cantidad de adhesivo PLA empleada correspondió al 10 % de la masa de fibra de piña utilizada, por lo que se usaron 47,1 g y 24,1 g respectivamente para cada espesor. La fabricación se realizó con una prensa termo-hidráulica de artesanía nacional con una capacidad total de prensado de 8000 kg (Muñoz & Moya, 2018). Las condiciones de prensado para la densificación de los paneles fueron presión específica de 3 kg/cm² y temperatura de las caras de la prensa de 175 a 185 °C por un tiempo estimado de una hora. Con el fin de no densificar en exceso el panel se realizaron unos topes de madera dura con el espesor deseado para los paneles de piña. Posterior los paneles se aclimataron en temperatura ambiente durante 10 minutos (ver la figura 2).



Figura 2. Paneles de madera laminada de balsa (izquierda) y paneles de fibra de piña (derecha) utilizados como almas de los tableros.

En el caso de las chapas de melina, se utilizaron trozas de Veneers preparation, se seleccionaron doce troncos de 1,3 m de largo con un diámetro promedio de 25 cm. Los troncos fueron sometidos a un torno industrial rotatorio de desenrollado en la Fábrica de Palillos Continental S.A. (FAPACO) en Heredia, Costa Rica, obteniendo chapas de 3 mm. Las chapas fueron secadas en un horno solar hasta alcanzar un contenido de humedad de entre 6 y 8 %. Luego, se prepararon un total de 40 chapas secadas con dimensiones de 60 cm de ancho x 60 cm de alto. Para las chapas se permitió una cantidad limitada de nudos y grietas.

La cantidad de adhesivo usado para cada una de las chapas fue de 127 gramos de PVA Grip Bond 2 marca Lanco (Lanco, 2016a) o un gramaje de 353 g/m². El pegado de las 3 capas se realizó con la misma prensa termo-hidráulica de artesanía nacional mencionada anteriormente. Las condiciones de prensado para la densificación de las 3 capas del tablero se modificaron de las especificadas en Muñoz & Moya (2018), siendo una presión específica de 6 kg/cm², temperatura de las chapas de 80 a 100 °C durante un aproximado de 40 minutos para los tableros con alma de madera de balsa; mientras que para los tableros con alma de fibra de piña una presión específica de 3 kg/cm², temperatura de las chapas de 60 °C durante un aproximado de 20 minutos. Para evitar un sobreexceso de presión sobre el tablero se fabricaron nuevos topes con las dimensiones deseadas para los tableros de 3 capas (ver la figura 3).



Figura 3. Resultados de los tableros de 3 capas con alma de fibra de piña (izquierda) y madera de balsa (derecha).

4.4 Disposición de los ensayos en los tableros de madera laminada de balsa y fibra de piña

Con el objetivo de aprovechar los prototipos adecuadamente se realizó un patrón de corte de las piezas necesarias para la realización de los ensayos, con el fin de obtener la mayor cantidad y calidad de repeticiones para cada uno de los prototipos.

Se realizó un único ensayo térmico con el objetivo de determinar la conductividad térmica de los tableros, también se emprendió un ensayo acústico a distintas condiciones de ruido para determinar las propiedades de reducción del sonido, además, se realizaron las determinaciones de densidad (DE_{12}), absorción de agua (WA) e hinchamiento en espesor (TS) y contenido de humedad (CH). Por último, se realizaron los ensayos de las propiedades mecánicas siendo los ensayos de compresión paralela (CP), tensión en paralelo (TP), flexión paralela (FP), flexión perpendicular (FE) y cortante al plano (CO).

La mayoría de las pruebas son ensayos destructivos que dañan la estructura interna y externa de los tableros por lo cual estos pudieron ser realizados una sola vez. De cada tablero se destinó una sección para la realización de cada uno de estos ensayos (ver la Figura 4). Algunas probetas de las propiedades mecánicas necesitaron la unión de varios espesores para su ensayo para el cual se utilizó el adhesivo Lanco Grip bond 4 (Lanco, 2016b). El seccionado se realizó en el laboratorio de Biomateriales de la Escuela de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica con ayuda de una sierra circular con un espesor de 4 mm.

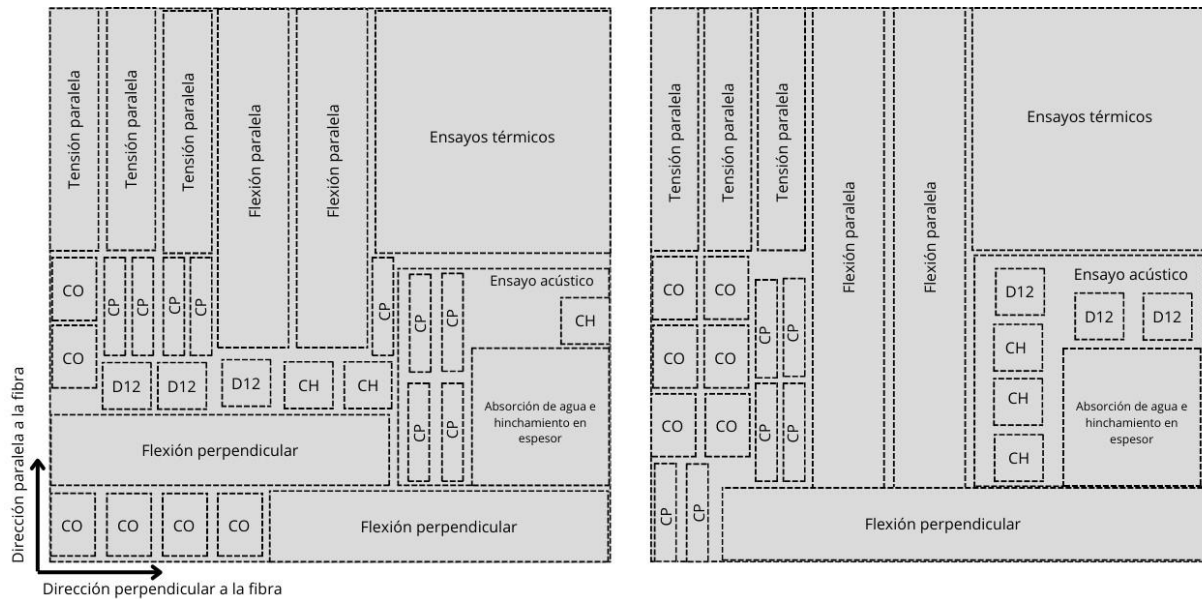


Figura 4. Distribución de probetas para los ensayos de propiedades físicas y mecánicas de los tableros a base de madera de balsa y fibra de piña. Distribución para tablero con espesor de 12,7 mm (izquierda), distribución para tableros de espesor 19,1 mm (derecha).

El ensayo térmico de los tableros se realizó en la facultad de tecnología de la madera y derivados de la madera en la universidad de Georg-August en Göttingen, Alemania. Los ensayos acústicos se realizaron en Cartago, Costa Rica, tomando las adecuadas previsiones para que las condiciones fueran ideales y con el menor ruido exterior posible. Todos los ensayos destinados a la determinación de las propiedades físicas y mecánicas se realizaron en el Laboratorio de Biomateriales de la Escuela de Ingeniería Forestal, ubicado en el Campus Tecnológico Central Cartago del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Ubicado en el cantón de Cartago de la provincia de Cartago, a una altitud promedio de 1435 m.s.n.m., con precipitación media anual de 1220 mm y temperaturas que oscilan entre los 15 a 26 °C (Weather Spark, 2016c).

4.5 Propiedades físicas y mecánicas

4.5.1 Determinación de las propiedades físicas

Para determinar las propiedades físicas de los tableros de madera y fibra se procedió a determinar el CH utilizando el método A de la normativa ASTM D4442-20 (ASTM, 2020a), la DE_{12} mediante el método A de la norma ASTM D2395-17 (ASTM, 2022), WA e TS utilizando el método B de la normativa ASTM D-1037-12 (ASTM, 2020b).

Densidad secada al aire

Para el cálculo de DE_{12} , se realizó la medición de la masa de los tableros con ayuda de una báscula en gramos. Igualmente es necesario obtener las dimensiones de la muestra para poder calcular el volumen en centímetros cúbicos y poder hacer uso de la Ecuación 1 (ASTM, 2022).

$$DE_{12}\% = \frac{\text{masa}}{\text{Volumen}} \quad (1)$$

Contenido de humedad

El CH se calculó a partir de la Ecuación 2, donde las mediciones de masa se realizaron con una báscula en gramos, antes (A) y después de ser secado al horno a una temperatura constante de 103 °C (B) (ASTM, 2020a).

$$CH\% = \frac{A - B}{B} \times 100 \quad (2)$$

Absorción de agua e hinchamiento en espesor

El porcentaje de WA y el TS se calculó tras 24 horas de inmersión horizontal a 25 mm de profundidad en agua potable a 20°C, las muestras deben de encontrarse secas al aire, además, debe de conocerse su espesor en milímetros (E_I) y peso en gramos (P_I) antes de la inmersión. Posterior a las 24 horas se retirar del agua se espera 10 minutos para retirar el exceso de agua y se dispone a obtener las medidas de espesor en milímetros

(E_I) y peso en gramos (P_F) de las muestras. El porcentaje de WA se obtiene en relación con las medidas de peso de las muestras acondicionadas y TS a partir del espesor de las muestras acondicionadas, haciendo uso de la Ecuación 3 y Ecuación 4 respectivamente (ASTM, 2020b).

$$WA \% = \frac{P_F - P_I}{P_I} \times 100 \quad (3)$$

$$TS \% = \frac{E_F - E_I}{E_I} \times 100 \quad (4)$$

4.5.2 Propiedades mecánicas

Se hizo uso de las normativas ASTM para determinar las propiedades mecánicas, las cuales fueron CO se determinará siguiendo la norma D1037-12 (ASTM, 2020b). Fuerza de CP se realizó según el método A presente en D1037-12 (ASTM, 2020b). La TP haciendo uso de la normativa D1037-12 (ASTM, 2020b), y por último la FP y FE, determinadas por el módulo de ruptura (MOR) y módulo de elasticidad (MOE) en flexión estática, siguiendo el método que se muestra en la normativa D1037-12 (ASTM, 2020b).

Para los ensayos se utilizó una máquina de pruebas universales Tinius Olsen H10KT con capacidad de 1000 kg, exceptuando la TP en la que se usó la máquina Tinius Olsen Super L.

Compresión paralela al tablero

La carga se aplicó sobre la probeta del tablero a una velocidad continua de 0,5 mm/min de modo que, se produzca la falla de 3 a 10 minutos desde el inicio del ensayo. La fuerza de compresión (F_c) se calculó con la Ecuación 5, a partir de la carga máxima (P_{max}) y el área transversal de la muestra, es decir ancho (b) y espesor (d) (ASTM, 2020b).

$$F_c = \frac{P_{max}}{b \times d} \quad (5)$$

Tensión paralela al tablero

Para la TP, siguiendo la norma se realizó las probetas con los estándares de medidas, sin embargo, el área de esfuerzo se disminuyó en 5 mm por cada lado para obtener una sección más reducida de aproximadamente 28 mm de ancho. La probeta se sujeta con mordazas de cada lado, la velocidad de movimiento durante el ensayo debe de ser constante, de modo que se rompa la probeta en un intervalo de 3 a 10 min después de iniciada la prueba, siendo 4 mm/min. La tensión máxima (R_t) se calculó siguiendo la Ecuación 6, siendo b y d, el ancho y espesor de la muestra respectivamente y (P_{max}) la carga máxima (ASTM, 2020b).

$$R_t = \frac{P_{max}}{b \times d} \quad (6)$$

Flexión estática perpendicular y paralela al tablero

En el caso de FP y FE, se hizo uso de los valores MOR y MOE para ambas flexiones, la velocidad de carga varía según el espesor de la muestra, por lo que para 12,7 mm fue de 6 mm/min y para 19,1 mm de espesor se seleccionó la velocidad de 9 mm/min. La distancia entre apoyos (L) debe de ser 24 veces mayor al espesor (d), siendo 300 mm para el espesor menor y 450 para los tableros de mayor espesor.

MOR y MOE en flexión

Para el cálculo de MOR y MOE, se usó la Ecuación 7 y Ecuación 8 respectivamente. Los valores necesarios para el cálculo se obtienen de los ensayos de flexión, para el MOR es necesario el ancho (b) y el espesor (d), además de la distancia entre apoyos (L) y la carga máxima aplicada (P_{max}) la cual debe ser justo en el centro de la muestra. Para el MOE se utilizó las mismas variables a excepción de la carga al límite proporcional (P_l) y la deflexión de la probeta al límite proporcional (Y_l) (ASTM, 2020b).

$$MOR = \frac{3 \times P_{max} \times L}{2 \times b \times d^2} \quad (7)$$

$$MOE = \frac{P_l \times L^3}{4 \times b \times d^3 \times Y_l} \quad (8)$$

Esfuerzo máximo cortante al plano del tablero

Con respecto a CO se hicieron muestras laminando cada probeta de manera que el plano de rotura sea el indicado y no las líneas de encolado de las capas. Se usó la Ecuación 9 para encontrar el máximo esfuerzo en cortante ($E_{c_{max}}$), donde (P_{max}) corresponde a la carga máxima, el ancho del área de cizalle en estado seco (b) y la profundidad del área de cizalle (d) (ASTM, 2020b).

$$E_{c_{max}} = \frac{P_{max}}{b \times d} \quad (9)$$

4.6 Propiedades térmicas y acústicas

4.6.1 Aislamiento térmico

Los ensayos de conductividad térmica se realizaron en la facultad de tecnología de la madera y derivados de la madera en la Universidad de Georg-August en Göttingen, Alemania, para lo cual por razones de tiempo y método de transporte de las muestras hasta Alemania solo se envió una muestra de cada diseño. El ensayo implicó un estimado de 3 horas para cada tablero, la tasa de calor utilizada fue de 1 °K/min.

La conductividad térmica de las muestras de 25 x 25 cm se evaluó utilizando un medidor de flujo térmico HFM 446 M, Lambda Eco-Line del Grupo NETZSCH, a temperaturas de 10, 20 y 30 °C. La evaluación se apegó a la norma UNE-EN 12667:2002, titulada «Comportamiento térmico de los materiales y productos de construcción. Determinación de la resistencia térmica mediante métodos de placa caliente protegida y caudalímetro de calor». En los ensayos se utilizó un aparato de probeta única, en el cual una probeta se sustituyó por una combinación de material aislante y una placa de protección.

El análisis térmico es un grupo de métodos analíticos utilizados para dar información sobre los materiales mediante el seguimiento de los cambios estructurales y de propiedades causados por las variaciones de temperatura. (Cárdenas et al., 2024)

4.6.2 Aislamiento acústico

Se realizó un ensayo con el fin de determinar las propiedades de atenuación del sonido de los paneles de madera de balsa y fibra de piña. Para obtener estos valores es necesario medir los niveles de potencia sonora antes y después de colocar la muestra. Además, es necesario el desarrollo de un protocolo sistema de medición del índice de atenuación del sonido. El sonómetro o decibelímetro es un instrumento que mide los niveles y capta los cambios de presión sonora en un momento y lugar específico, siendo el decibel la unidad de medida del instrumento (González et al., 2008; Guzmán, 2017).

Equipo para el ensayo acústico

- Sonómetro
- Cámara de insonorización
- Amplificador con parlante
- Portátil emisor de ondas/Generador de funciones

Procedimiento para la determinación de coeficientes de absorción del sonido y reducción del sonido

Para la obtención de los valores de aislamiento acústico se dispuso de los instrumentos como se muestra en la figura 5, teniendo como emisor de funciones el computador portátil conectado al parlante o amplificador dentro de un cajón de insonorización, el cual fue construido artesanalmente en el Laboratorio de Biomateriales (ver figura 6). El cajón presentaba una distancia de 30 cm desde el parlante hasta el área donde se coloca la muestra, que debe de colocarse perpendicular para garantizar una incidencia directa del sonido y firmemente apoyado sobre el marco para así garantizar el mayor aislamiento posible. El sonómetro extech 407780 en ponderación A se colocó a una distancia de 30 cm al área de colocación de la muestra.

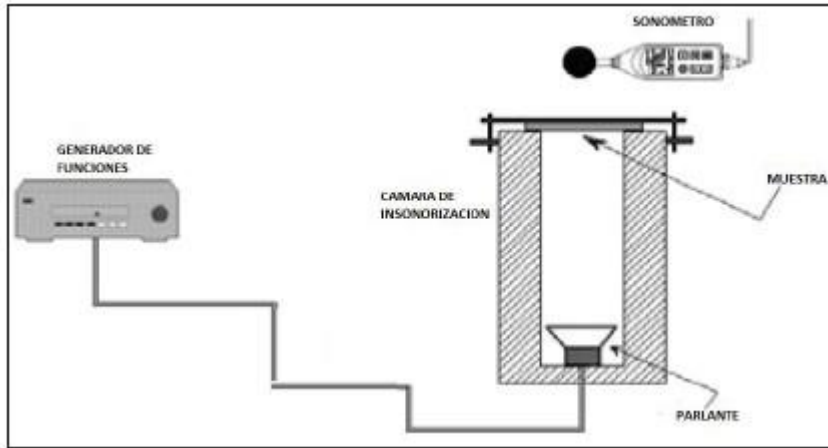


Figura 5. Disposición de los instrumentos para la realización del ensayo acústico a las muestras de tableros. Fuente: (Atahuachi & Carcausto, 2018).



Figura 6. Cajón de insonorización (izquierda) y cámara de insonorización (derecha) utilizadas en los ensayos acústicos. Agradecimientos a HdM por el préstamo de la cámara de insonorización.

Se realizaron 5 repeticiones por cada tablero, los instrumentos se colocaron dentro de una cámara de insonorización más grande (ver figura 6) para tener condiciones más controladas y a horas de la noche para así reducir interferencias de ruidos exteriores a los ensayos. Se registraron los valores en decibeles obtenidos por el sonómetro a distintas frecuencias, específicamente 250, 500, 1000, 2000 4000 y 8000 Hz. Los resultados de los ensayos acústicos se compararon con 20 valores anteriormente registrados sin barrera al sonido los cuales se nombraron como “testigo”. Además, también se usó un producto comercializado en el país como un aislante acústico a base de fibras de plásticos y polímeros que se nombró “polímero”.

Perdida de transmisión del sonido (STL) y coeficiente de perdida de transmisión del sonido (STC)

La pérdida de transmisión del sonido se define como la diferencia en la intensidad sonora producida por la fuente sonora sin el material aislante y la intensidad o ruido transmitido después de colocar la muestra o tablero aislante. Se representa por medio de valores numéricos para cada tablero y frecuencia utilizada. Cuanto más elevado el valor, mayor la perdida de sonido causado por el tablero.

Por su parte, el coeficiente de transmisión del sonido se define como el promedio de los valores STL para cada muestra o material utilizado.

Coefficiente de Absorción del sonido (SAC) y coeficiente de reducción del sonido (NRC)

El SAC se obtiene a través de la Ecuación 10, representado una parte del STL comparado con el NPS cuando no hay aislante.

$$SAC = NRC \text{ ideal} \times \frac{STL}{NPS} \quad (10)$$

Donde NRC ideal = 1, STL: valor de pérdida de transmisión del sonido de una frecuencia específica, NPS: valor sin aislante de la frecuencia determinada.

El coeficiente de reducción del sonido NRC corresponde al promedio de los valores SAC de todas las frecuencias para una muestra o material.

4.7 Análisis de los datos

4.7.1 Estadística de propiedades físicas y mecánicas

El procedimiento estadístico se analizó en los programas de Microsoft Excel e InfoStat que serán utilizado para verificar la normalidad de los datos obtenidos. La descripción de la estadística general (promedio y coeficiente de variación) y se realiza un análisis de varianza (ANOVA) para determinar las diferencias significativas tanto en las propiedades físicas como las mecánicas de los prototipos analizados. Así mismo, una prueba de Tukey ($p\text{-value} < 0,01$) para verificar diferencias significativas entre las medias de cada espesor de tablero.

4.7.2 Estadística de propiedades acústicas

Se sigue el procedimiento estadístico en los programas Microsoft Excel e InfoStat para verificar la normalidad de los datos obtenidos. Se hace la descripción de la estadística general (promedio y coeficiente de variación) y se realiza un análisis de varianza (ANOVA) para determinar las diferencias significativas entre los valores térmicos y acústicos obtenidos en los ensayos para los tableros. Se realizó una prueba de Tukey ($p\text{-value} < 0,01$) para verificar diferencias significativas entre las medias de los resultados para cada espesor de tablero de madera y fibra.

5 RESULTADOS

5.1 Propiedades físicas

En el cuadro 2 se pueden observar los resultados promedio obtenidos para las propiedades físicas de los tableros evaluados. Aquí se evidencia que los tableros de fibra de piña resultaron con espesores menores a los esperados siendo aproximadamente 2 mm más fino que los tableros de madera laminada de balsa que promediaron valores muy cercanos a los deseados en el estudio con 18,63 mm y 12,47 mm. Igualmente se demuestran los promedios de CH para cada tipo de tablero y se muestra que el prototipo FG con un valor promedio de 11,26 % presenta una diferencia significativamente menor al resto de los prototipos que presentan un promedio entre el 12 y 13 % de CH.

Cuadro 2. Propiedades físicas obtenidas para cada diseño evaluado.

| Propiedades físicas | Tablero | | | |
|---------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| | MG | MD | FG | FD |
| Espesor (mm) | 18,63 (0,68) ^A | 12,47 (0,47) ^C | 16,47 (1,01) ^B | 10,46 (0,83) ^D |
| DE12 (kg/m ³) | 222,00 (19,63) ^C | 266,26 (6,49) ^B | 210,03 (11,20) ^C | 300,54 (15,79) ^A |
| CH (%) | 12,85 (0,13) ^A | 12,72 (0,53) ^A | 11,26 (0,50) ^B | 12,33 (0,31) ^A |
| WA (%) | 69,00 (10,38) ^B | 60,03 (11,33) ^B | 127,72 (13,87) ^A | 103,58 (11,72) ^A |
| TS (%) | 0,92 (0,29) ^B | 1,53 (0,48) ^B | 3,40 (0,52) ^B | 8,52 (2,49) ^A |

Nota: Los datos en paréntesis corresponden a la variación de los resultados obtenidos para cada característica, haciendo uso de la desviación estándar. Las letras en superíndice corresponden a los resultados del análisis estadístico realizado (ANDEVA) y letras distintas presentan diferencias significativas entre sí. A = promedio significativamente mayor; D = promedio significativamente menor.

En el parámetro de densidad promedio se encontró que el prototipo de fibra delgada FD fue el que presentó la mayor densidad, seguido MD y con un valor estadístico de densidad igual los tableros MG y FG (Cuadro 2). En la figura 7 se presentan los valores

de densidad promedio de los tableros en comparación con la densidad promedio de las almas de cada prototipo, en la que se observa que los tableros de madera de balsa tienen una densidad de alma similar más no igual de 137 y 141 kg/m³, mientras que el diseño FG si presentó la densidad deseada para los paneles de fibra de piña de 100 kg/m³, siendo FD el que aumentó considerablemente su densidad a 160 kg/m³.

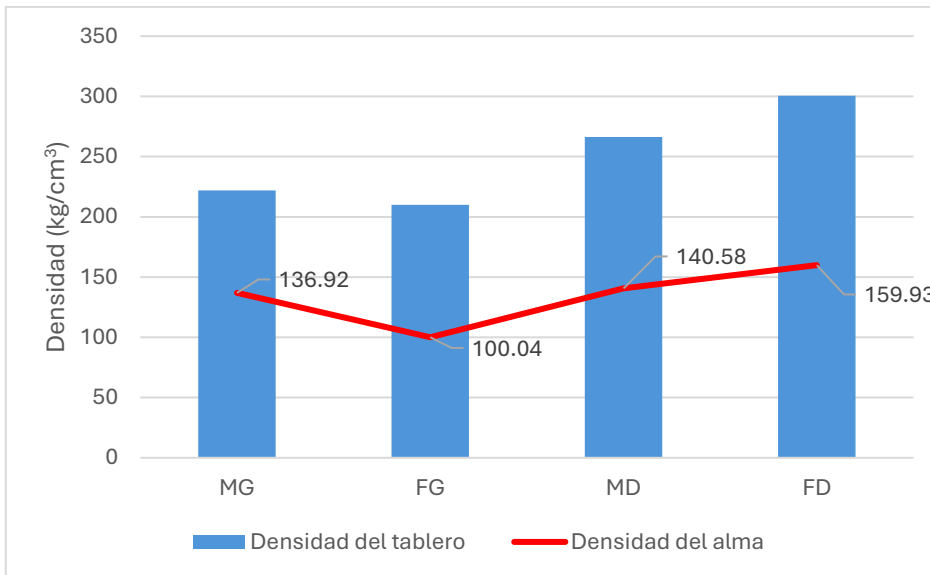


Figura 7. Promedios de la densidad total del tablero y la densidad del alma para cada diseño.

Los tableros de fibra de piña son los que presentan mayor porcentaje de absorción de agua, superando en su mayoría el 100 % de su peso en ganancias de agua con 128 % el modelo FG y 104 % FD. Por ende, también se puede observar que son los tableros que presentan un mayor incremento en el espesor del tablero, mientras que los tableros de madera de balsa obtuvieron resultados WA de 69 y 60 % para modelo FG y FD respectivamente (ver cuadro 2).

En el caso del hinchamiento de espesor, el diseño de fibra delgada FD son los tableros que estadísticamente muestran una diferencia considerable con respecto a los demás tableros en el hinchamiento del espesor con 8,52 %, FG 3,40 %, MD y MG 1,53 y 0,92

% respectivamente, en la figura 8 se muestra la relación de absorción de agua con el hinchamiento en el espesor de cada tablero.

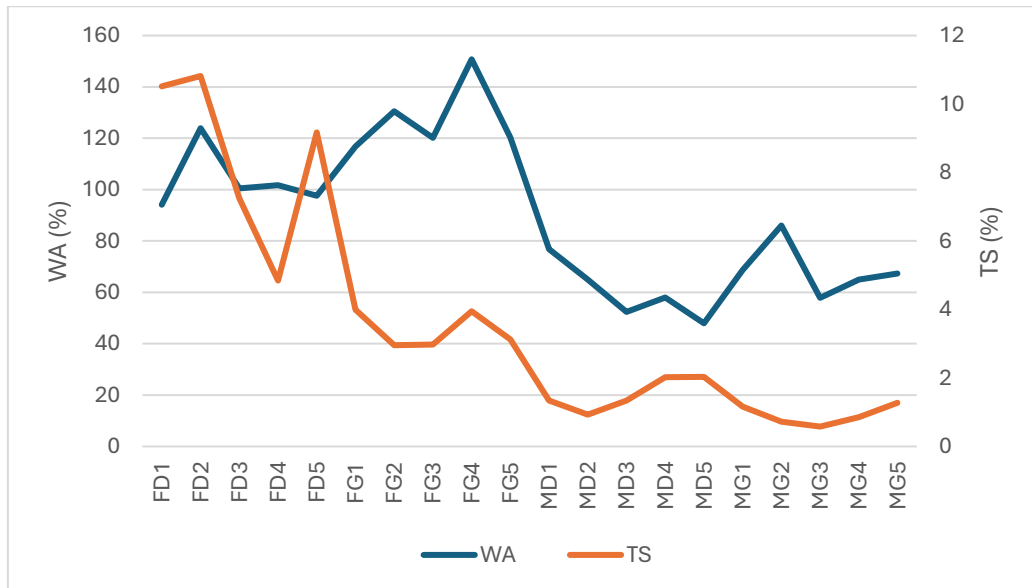


Figura 8. Porcentaje de absorción de agua para cada tablero y el hinchamiento obtenido en el espesor por parte de los tableros de fibra de piña y madera laminada de balsa.

5.1 Propiedades mecánicas

En el cuadro 3 se puede observar el resultado obtenido para cada uno de los ensayos mecánicos realizados a los tableros.

Cuadro 3. Propiedades mecánicas de los tableros a partir de madera laminada de balsa y fibra de piña.

| Propiedades mecánicas | | Tablero | | | |
|-----------------------|-----|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| | | MG | MD | FG | FD |
| CP (MPa) | | 6,06 (1,11) ^B | 9,36 (2,21) ^A | 2,79 (1,36) ^C | 5,97 (1,59) ^B |
| TP (MPa) | | 9,30 (2,60) ^B | 16,08 (2,52) ^A | 8,85 (3,16) ^B | 16,50 (4,16) ^A |
| CO (MPa) | | 0,425 (0,132) ^A | 0,401 (0,125) ^A | 0,007 (0,003) ^B | 0,007 (0,003) ^B |
| FE (MPa) | MOR | 1,20 (0,40) ^A | 1,23 (0,20) ^A | 0,48 (0,10) ^C | 0,79 (0,22) ^B |
| | MOE | 10,75 (2,13) ^A | 8,38 (2,77) ^B | 3,63 (1,64) ^D | 5,59 (1,89) ^C |
| FP (MPa) | MOR | 19,04 (4,13) ^B | 30,55 (3,75) ^A | 2,16 (0,58) ^D | 5,12 (1,10) ^C |
| | MOE | 451,93 (36,01) ^B | 527,00 (35,74) ^A | 9,16 (1,79) ^D | 25,30 (8,37) ^C |

Nota: Los datos en paréntesis corresponden a la variación de los resultados obtenidos para cada característica, haciendo uso de la desviación estándar. Las letras en superíndice corresponden a los resultados del análisis estadístico realizado (ANDEVA) y letras distintas presentan diferencias significativas entre sí. A = promedio significativamente mayor; D = promedio significativamente menor.

5.1.1 Ensayo de resistencia a la compresión paralela

El análisis de varianza demuestra que el tablero MD con 9,36 MPa presenta diferencias significativamente mayores a los tableros MG y FD con 6,06 y 5,97 MPa respectivamente, mientras tanto el prototipo MG con 2,79 MPa tiene valores significativamente menores siendo el que presenta menor resistencia a la compresión paralela al plano (ver cuadro 3). En la figura 9 se observa la resistencia en relación con el número de espesor que conforman la probeta. Además, se evidencian resultados superiores en los prototipos de madera laminada de balsa respecto a los de fibra de piña.

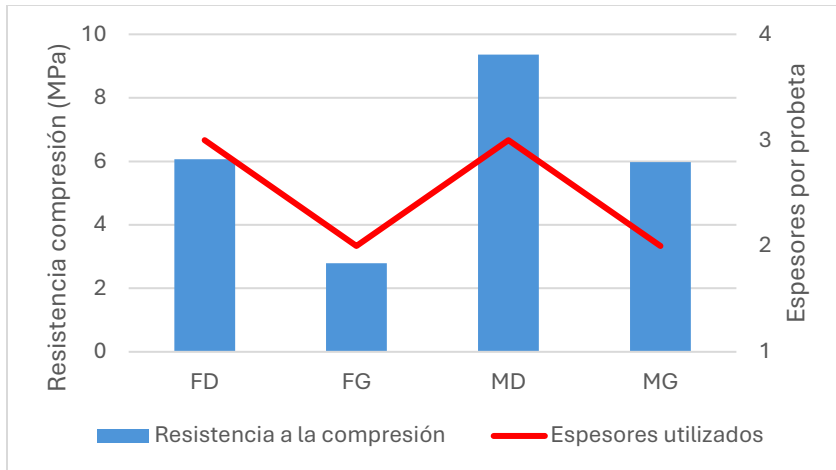


Figura 9. Resistencia a la compresión paralela respecto al número de espesor utilizados para la probeta.

5.1.2 Ensayo de resistencia a cortante al plano del tablero

En el cuadro 3 se observa que los tableros MG y MD son estadísticamente superiores a los tableros constituidos por la fibra de la piña resistiendo 0,335 y 0,288 MPa respectivamente, muy superior a los 0,007 MPa reportados para ambos prototipos de fibra de piña. Los resultados en la figura 10 exhiben una gran diferencia de resistencia cortante por parte de los prototipos estudiados proporcional a la dureza del material utilizado como capa central.

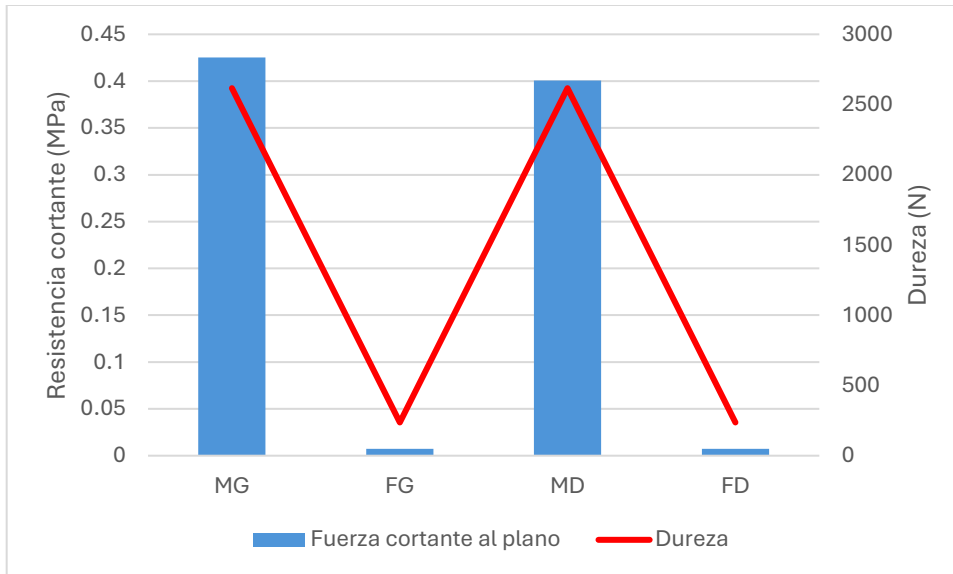


Figura 10. Resistencia a fuerza cortante que soportan las almas o capa interior de los prototipos con respecto a la dureza de los dos materiales utilizados.

5.1.3 Ensayo de resistencia a la tensión paralela

El ANOVA muestra que las probetas de menor área fueron las que soportaron significativamente mayor estrés a la tensión paralela (ver el cuadro 3). En la figura 11 se evidencian el valor promedio de los prototipos en semejanza con el área del cuello de la probeta. Los prototipos FD y MD promediaron 16,50 y 16,08 MPa, mientras que los modelos MG y FG obtuvieron valores de 9,30 y 8,85 MPa respectivamente.

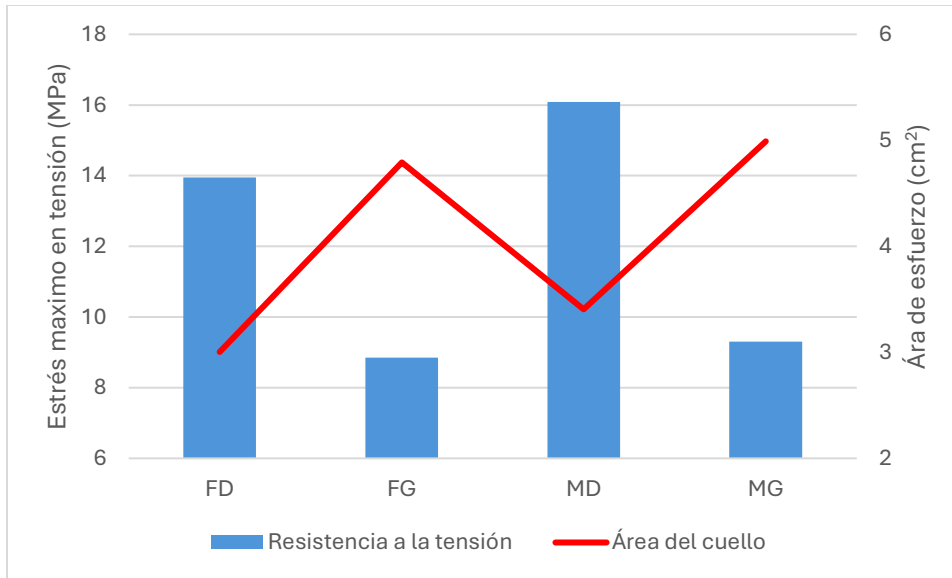


Figura 11. Promedio de resistencia a la tensión paralela en semejanza con el área del cuello de la probeta para cada prototipo.

5.1.4 Ensayo de flexión perpendicular a la dirección principal del tablero

El cuadro 3 presenta la flexión perpendicular y evidencia que no existen diferencias significativas entre los tableros de madera de balsa en el módulo de ruptura (MOR) los cuales tienen los mayores resultados con 1,23 MPa para MD y 1,20 MPa para MG, siendo el prototipo FG el que obtuvo menor valor con 0,48 MPa. En el caso del módulo de elasticidad aparente (MOE) si se presentan diferencias significativas entre los promedios de todos los prototipos, siendo MG el que tuvo mayor valor con 10,75 MPa seguido de MD, FD y el de menor valor igualmente fue el modelo FG con 3,63 MPa. La figura 12 y 13 comparan los valores de MOR y MOE respectivamente para los promedios obtenidos, así como su varianza entre los tableros realizados.

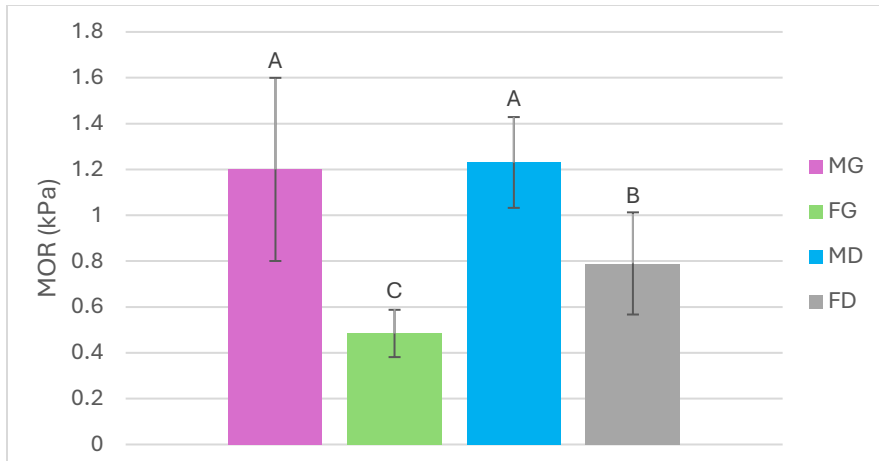


Figura 12. Módulo de ruptura (MOR) de la flexión perpendicular a la fibra.

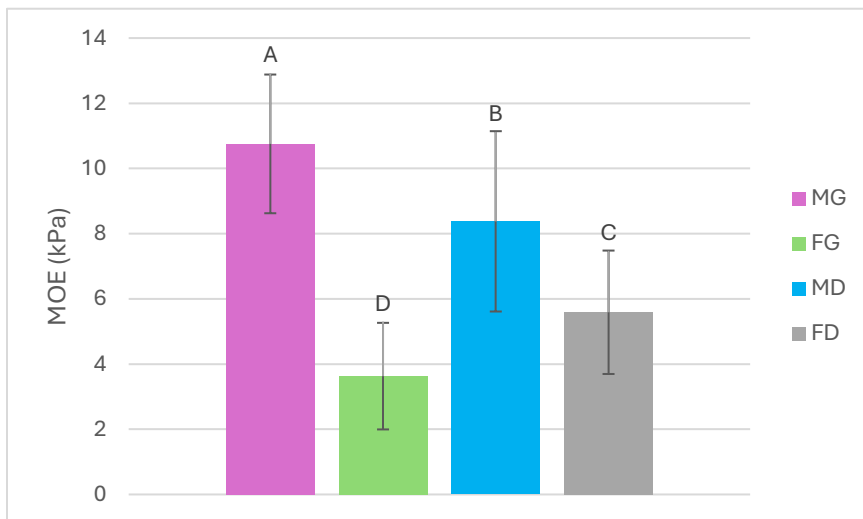


Figura 13. Módulo de elasticidad (MOE) para la flexión perpendicular a la orientación de la fibra de los tableros.

5.1.5 Ensayo de flexión paralela al grano del tablero

En el cuadro 3 se observan los resultados del MOR y sus diferencias estadísticamente significativas siendo MD el mayor con 30,55 MPa, seguido por MG con 19,04 MPa, así como FD y FG con 5,12 y 2,16 MPa respectivamente. Los promedios MOE muestran el modelo MD como el que obtuvo significativamente los mejores valores de módulo de elasticidad con 527 MPa, seguido por MG con 451,93 MPa, mientras que los tableros de

fibra FD y FG no presentan diferencias entre ellos con valores de 25,3 y 9,16 MPa. La figura 14 y 15 comparan los valores de MOR y MOE respectivamente para los promedios obtenidos en flexión paralela de los tableros.

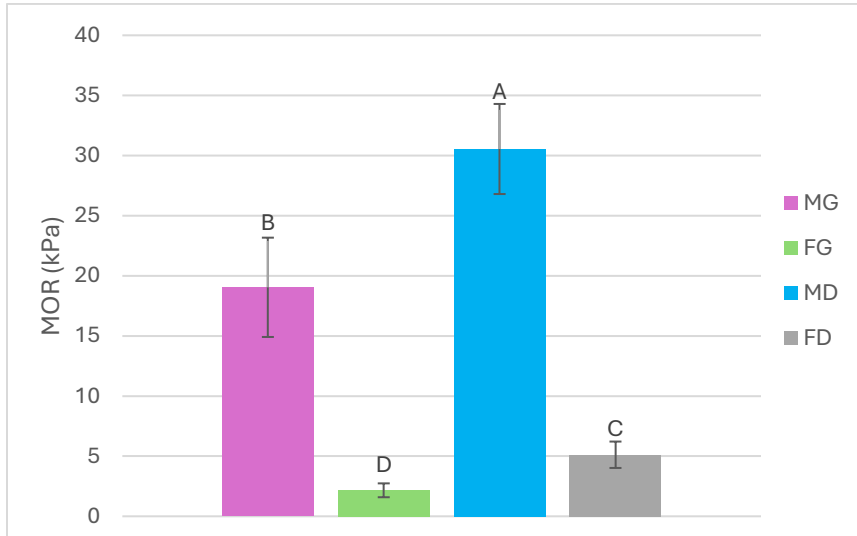


Figura 14. Módulo de ruptura (MOR) para la flexión paralela de los tableros estudiados.

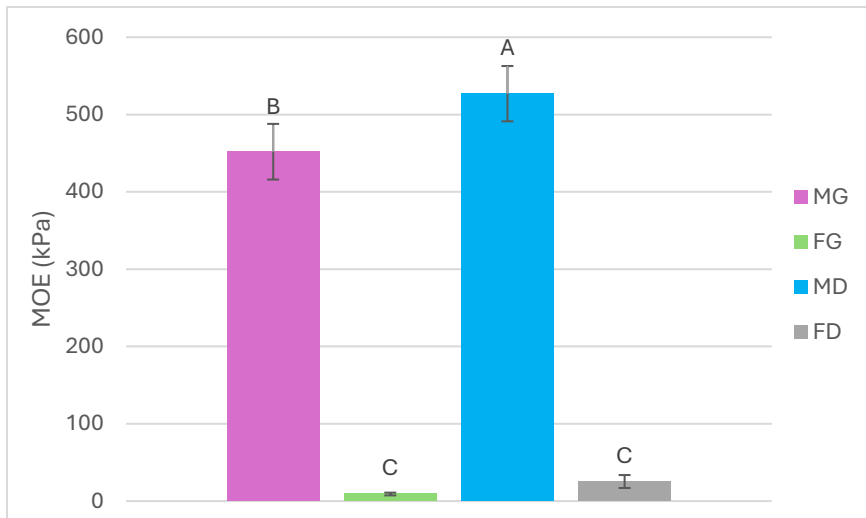


Figura 15. Módulo de elasticidad (MOE) para la flexión paralela a la orientación de la fibra de los tableros.

5.2 Propiedades acústicas

5.2.1 Datos acústicos registrados

En la figura 16 se expone el promedio de decibeles registrados por el sonómetro en distintas frecuencias para cada uno de los prototipos testeados en el ensayo.

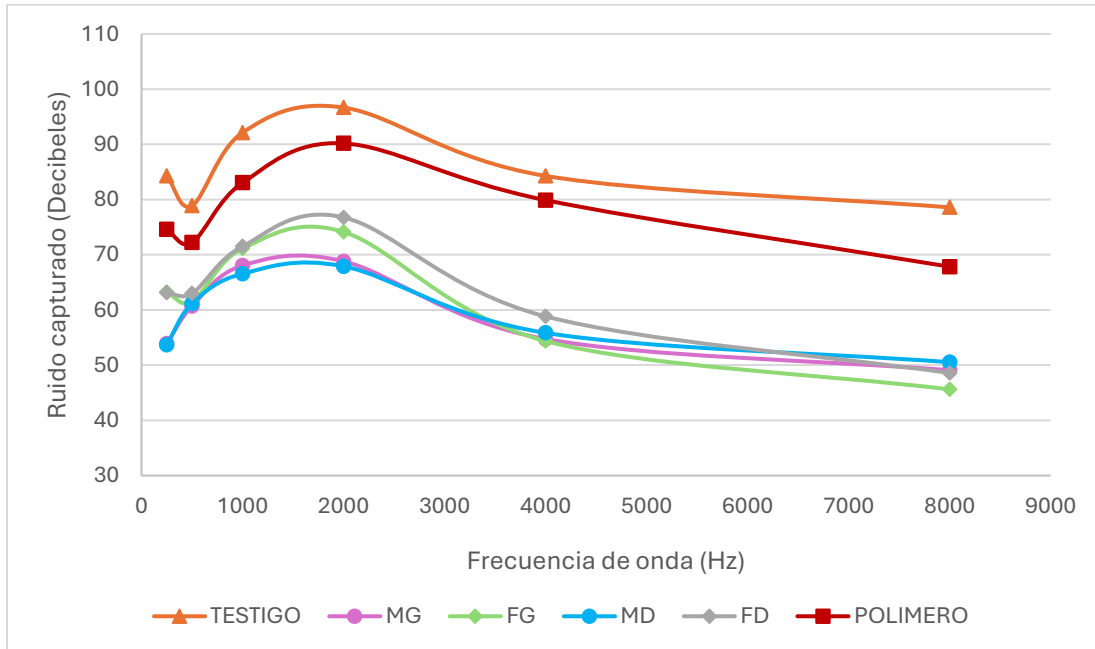


Figura 16. Promedio de los valores para cada uno de los prototipos en las distintas frecuencias de onda evaluadas.

5.2.2 Coeficientes de absorción y reducción del sonido

Utilizando la ecuación 10, los valores testigo y los resultados STL, se calcula el SAC. En la figura 17 se observan los valores SAC promedio de los prototipos para cada una de las frecuencias testeadas con respecto al valor límite de absorción acústica para materiales porosos (Attal et al., 2019). En la figura 18 se evidencia la curva de valores SAC promedio para cada modelo hasta 2000 Hz.

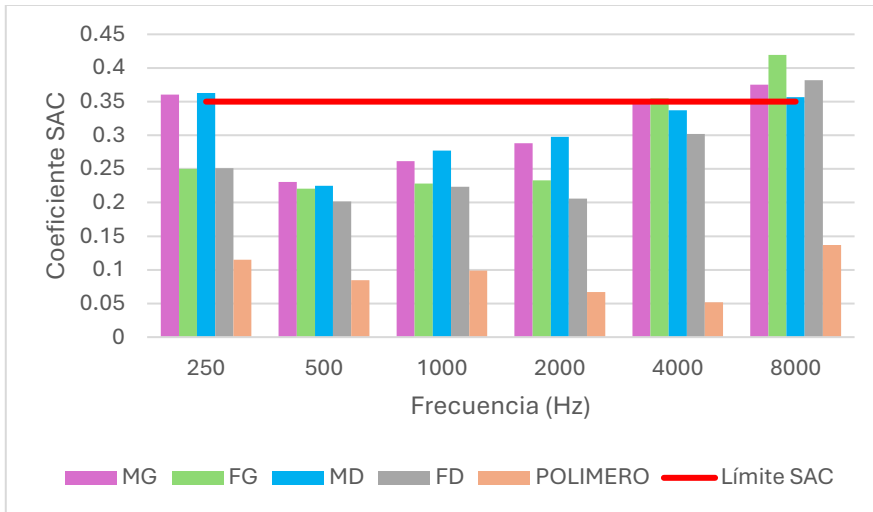


Figura 17. Coeficientes de absorción del sonido (SAC) de los prototipos para cada frecuencia analizada.

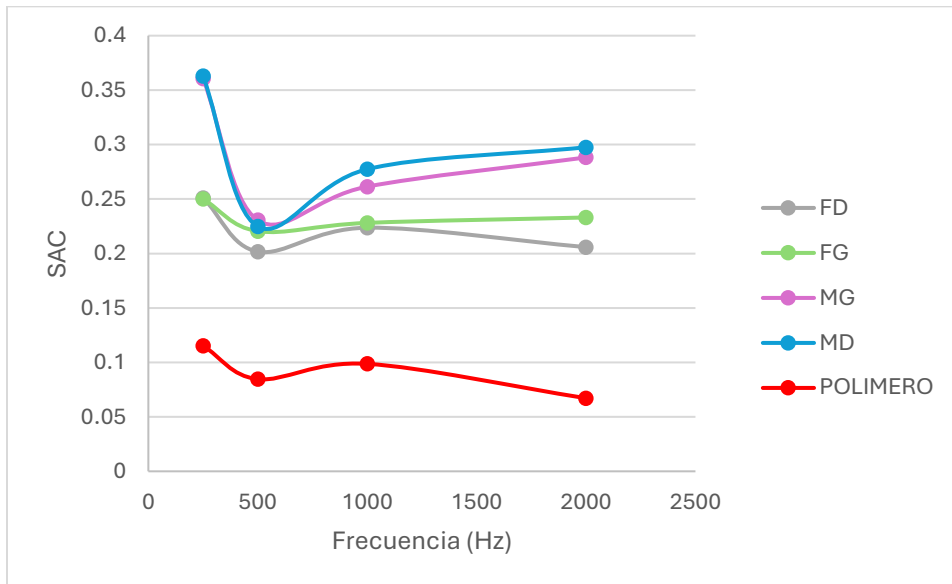


Figura 18. Curva de absorción del sonido (SAC) de los prototipos hasta los 2000 Hz.

Al promediar los valores SAC de todas las frecuencias se obtiene el coeficiente de reducción del sonido NRC para cada muestra. En la figura 19 se evidencia la superioridad estadística de los prototipos de madera de balsa laminada con un valor del coeficiente de 0,31 MG y MD, continuo los tableros de fibra gruesa FG con 0,28, fibra delgada FD 0,26 y ultimo el panel a base de polímeros con 0,09.

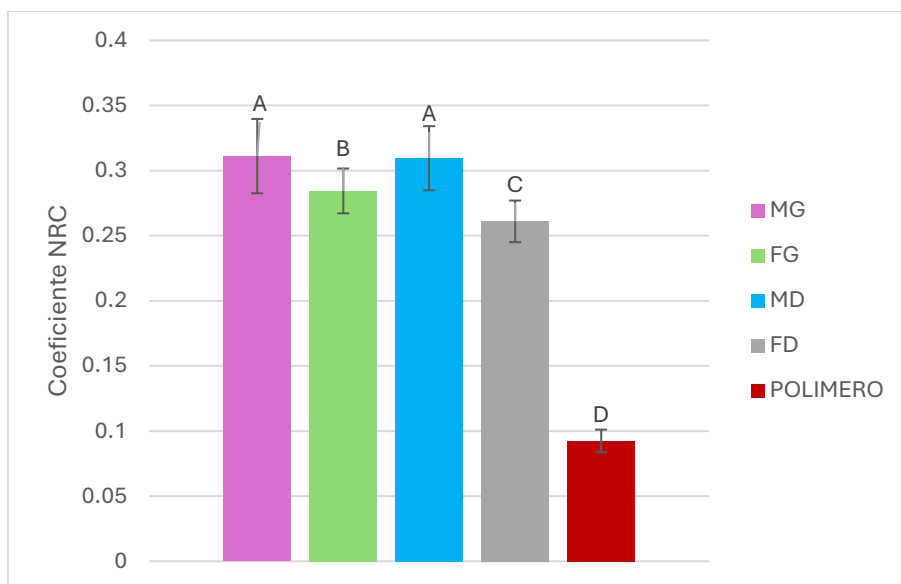


Figura 19. Coeficientes de reducción del sonido obtenidos para cada prototipo evaluado.

En el cuadro 4 se observan los valores SAC y NRC obtenidos hasta los 2000 Hz, ya que en estudios similares donde se analiza la aislación acústica de paneles de fibra de pinya los ensayos se realizan hasta estas frecuencias. Los modelos MG Y MD fueron los que obtuvieron mejores resultados de NRC con 0,29 ambos prototipos, mientras que FG y FD lograron valores de 0,23 y 0,22 respectivamente.

Cuadro 4. Valores SAC para las frecuencias 250, 500,1000, 2000 Hz y NRC.

| Frecuencia | Tablero | | | | | |
|------------|---------|------|------|------|----------|------|
| | FD | FG | MD | MG | POLIMERO | |
| SAC | 250 | 0,25 | 0,25 | 0,36 | 0,36 | 0,12 |
| | 500 | 0,20 | 0,22 | 0,23 | 0,23 | 0,09 |
| | 1000 | 0,22 | 0,23 | 0,28 | 0,26 | 0,10 |
| | 2000 | 0,21 | 0,23 | 0,30 | 0,29 | 0,07 |
| NRC | 0,22 | 0,23 | 0,29 | 0,29 | 0,09 | |

5.3 Propiedades térmicas

En el cuadro 5 se exhiben las características encontradas para los prototipos analizados como a su vez los valores de conductividad térmica obtenidos.

Cuadro 5. Valores de las probetas para ensayos térmicos.

| Prototipo | Espesor (mm) | Volumen (cm ³) | Masa (g) | Densidad (gr/cm ³) | Conductividad térmica (W/mK) |
|-----------|--------------|----------------------------|----------|--------------------------------|------------------------------|
| FD | 10 | 6,08 | 202,94 | 33,40 | 0,0529 |
| FG | 17 | 10,25 | 255,79 | 24,97 | 0,0560 |
| MD | 12 | 7,29 | 213,76 | 29,32 | 0,1068 |
| MG | 19 | 11,59 | 219,31 | 18,92 | 0,0815 |

En la figura 20 se observan los valores de conductividad térmica de los tableros con alma de madera laminada de balsa y fibra de piña en un rango de 10 a 30 °C. En los anexos 1 a 4 se muestra en mayor detalle cada uno de los ensayos de conductividad térmica realizados para cada prototipo.

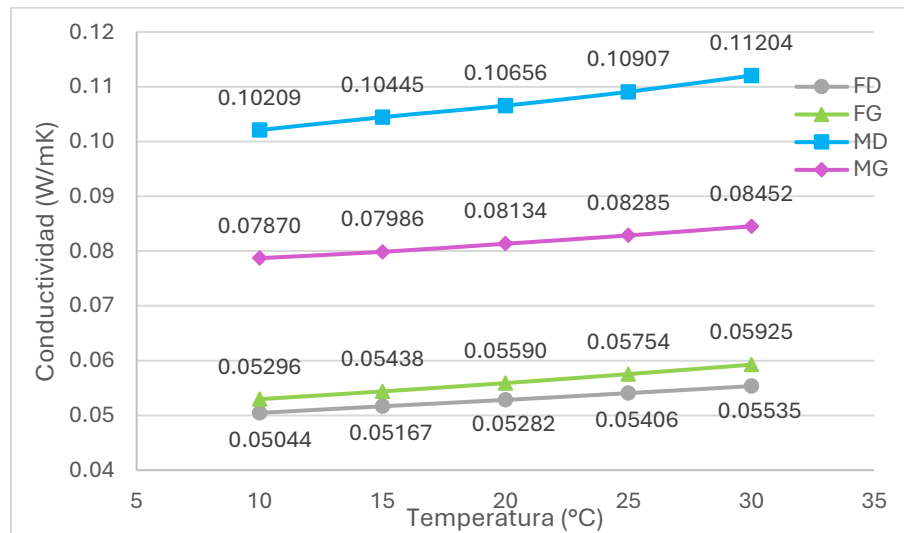


Figura 20. Resultados del ensayo de conductividad térmica para los prototipos estudiados.

6 DISCUSIÓN

6.1 Análisis físico

Según datos de la FAO (2020) tableros de fibra con densidades menores a 400 kg/m^3 se consideran tableros aislantes o de baja densidad. Esta propiedad física del tablero a base de materiales biológicos depende principalmente de la densidad y el contenido de humedad de la materia prima y la fuerza aplicada en el proceso de prensado. Sin embargo, la variación de la densidad dentro del tablero es posible (Zambrano et al., 2013). Los tableros realizados en este estudio varían en su densidad de 210 a 301 kg/m^3 pudiendo por lo tanto categorizarse como tableros aislantes.

En el cuadro 2 se puede observar que los tableros delgados o de menor espesor fueron los que obtuvieron mayores valores de densidad, teniendo los prototipos FD y MD valores de 301 y 266 kg/m^3 sobre los valores obtenidos de 210 y 222 kg/m^3 para los prototipos FG y MG respectivamente. Esto puede ser explicado por un prensado mayor al requerido durante el pegado de las chapas, lo cual fue previsto en la fabricación de los tableros por lo cual se realizaron topes colocados a cada borde del tablero para evitar un prensado mayor al esperado. Sin embargo, el diseño de la prensa hidráulica utilizada con un único pistón central no asegura que resulte un prensado homogéneo en toda el área de las planchas, especialmente en materiales tan suaves como la fibra de piña.

La densidad de la madera de melina se aproxima a 400 kg/m^3 (Hernández et al., 2024). Conociendo el volumen que ocupan las chapas y la densidad aproximada de la madera se puede obtener la relación de peso de la melina con respecto a los tableros. La figura 7 muestra la relación proporcional de la densidad del alma o capa central con la densidad total del tablero. Cabe recalcar que todas las capas de los tableros son materiales biológicos y no se puede asegurar una densidad homogénea de la materia prima, sumando el sesgo humano durante la producción artesanal de los paneles, provoca que existan zonas con una mayor o menor densidad dentro del tablero.

El contenido de humedad para todos los tableros se aproxima al 12 % sin encontrar diferencias significativas en el análisis de varianza con excepción del prototipo FG que

tuvo un valor de 11,26 %. Un bajo contenido de humedad de las materias primas es importante durante el proceso de fabricación de los tableros con el fin de evitar que la presión de vapor durante el prensado a altas temperaturas dañe la integridad de estos, además que permite una mayor absorción de agua e hinchamiento en volumen.

Zambrano et al., (2013) mencionan que tableros de baja densidad presentan un hinchamiento mayor debido a la facilidad del agua para penetrar los capilares y espacios entre partículas. Al sumergir las muestras 24 horas en agua permite saturar las paredes celulares de las fibras, que al presentar un bajo contenido de humedad tienen una amplia capacidad de absorber, lo que produce el hinchamiento en las partículas, generando finalmente la variación del espesor del tablero.

En el cuadro 2 se evidencia el porcentaje de absorción de agua de los tableros de fibra siendo 128 % y 104 % correspondiente a los modelos FG y FD. Las fibras vegetales poseen una gran afinidad con la humedad del ambiente, lo que les permite absorber agua con mayor facilidad (Kotteesvaran et al., 2024). Los paneles de madera laminada de balsa por su parte presentaron porcentajes de absorción de 69 % y 60 % para los prototipos MG y MD. La madera de balsa presenta una disposición dentro del tablero en la que la cara transversal se encuentra adherida a la chapa de melina lo que puede llegar a dificultar la absorción de agua a través de los vasos capilares de la madera. Los paneles con el mayor grosor tuvieron mayor WA % lo que indica que entre mayor sea el área expuesta mayor será la absorción de agua.

El cuadro 2 también muestra que el hinchamiento en el espesor fue igualmente mayor en los tableros a base de la fibra de piña, se consiguieron valores de 8,5 % para el prototipo FD y 3,4 % para FG, muy superiores a los valores de 1,5 % y 0,9 % que corresponden a los prototipos MD y MG. En la figura 8 se presenta gráficamente la relación del hinchamiento en el espesor con la cantidad de agua absorbida por cada tablero, evidenciando un aumento significativo en el prototipo FD, que además son los tableros con mayor densidad, lo que indica que estos tableros presentan mayor materia en un espacio reducido, permitiendo así un mayor aumento del espesor.

6.2 Análisis mecánico

Rojas et al., (2004) reportan en su estudio fuerzas de compresión paralela al grano de 24,6 MPa para madera solida de melina, en un área de 25 cm² según las normas ASTM. Hernández et al., (2024) registran promedios de compresión longitudinal de 36,9 MPa obtenidos de probetas de 20x20x60 mm según las normas DIN 52 185. Para la realización de las probetas FG se pegaron dos espesores del tablero, lo que es igual a 4 chapas de melina por probeta con un área aproximada de 3 cm² de madera soportando 2,79 MPa. En el caso de las probetas FD se usaron 3 espesores siendo 4,5 cm² de madera por cada probeta resistiendo 5,97 MPa de compresión, siendo valores muy cercanos a los registrados para la madera solida de melina. Por lo tanto, los tableros de fibra de piña presentan resistencia a la compresión gracias a las chapas de melina utilizadas en ambas caras.

En el caso de la madera de balsa se reportan fuerzas de compresión de 9,95 MPa en compresión paralela y de 0,36 a 0,83 MPa en compresión perpendicular, siendo esta última la que concuerda con la disposición de la madera de balsa en los tableros realizados (Marcillo, 2018; Ecobalsa, 2010; Moncayo et al., 2018). Los tableros MG y MD presentan 6,06 y 9,36 MPa en compresión paralela desempeñando una buena resistencia a la compresión en comparación con los datos registrados gracias a la presencia de las chapas de melina utilizadas. La figura 9 muestra la relación de la resistencia a la compresión en relación con los espesores utilizados, lo cual equivale a mayor cantidad de madera de melina y adhesivo utilizado, que proporciona una mayor rigidez y resistencia a las muestras utilizadas. Esto indica que la madera de melina le proporciona una gran resistencia al tablero, evidenciando que la fibra de piña presenta una resistencia prácticamente nula a la compresión, por lo cual se determina la importancia de utilizar tableros de distintos materiales que le proporcionen estabilidad, resistencia y protección a los paneles de fibra y balsa.

La dureza es una herramienta importante para la diferenciación de los materiales, como para el desarrollo y mejora de tecnologías (Palma et al., 2023). En su estudio Palma et

al., (2023) determina la dureza de paneles a partir de 4 fibras naturales entre ellas la fibra de piña en 236,6 N, mientras que para la madera de balsa el valor de dureza dispuesto por Ecobalsa (2010) es de 4086,6 N paralela y 2616,6 N para los laterales, lo cual concuerda con la disposición de la balsa en los tableros realizados.

El cuadro 3 muestra la resistencia obtenida en el ensayo a la cizalla o cortante al plano de los prototipos, en el cual se presentaron valores significativamente distintos de resistencia entre los materiales evaluados. La fibra de piña obtuvo un valor de 0,007 MPa de resistencia para ambos espesores de tableros, mientras que los prototipos a base de madera de balsa resultaron con una resistencia de 0,425 y 0,401 MPa para los prototipos MG y MD respectivamente. Moncayo et al. (2018) registraron en su estudio de balsa valores de cizalla paralela a la fibra de 0,7 MPa, lo cual concuerda con una mayor dureza registrada en una disposición paralela de la madera.

Kotteesvaran et al., (2024) mencionan que una de las desventajas de las fibras naturales es la mala unión superficial entre la fibra y la matriz de un compuesto, lo cual generalmente disminuye su resistencia física y su estabilidad. La presencia de ceras en la pared celular y la hidrofilia de las fibras naturales son causantes de la baja adhesión. Estas características de las fibras le brindan propiedades mecánicas muy bajas de resistencia, pero le dan mayor flexibilidad y versatilidad.

La figura 10 muestra la relación de resistencia con la dureza del material donde se observa una proporcionalidad de resistencia al cizalle en relación con la dureza del material. Además, debido a la deficiente unión de las fibras con los adhesivos el tablero con núcleo de fibra de piña no soporta el arrastre y se desprende fácilmente del material que en este caso es la madera de melina.

Algunos materiales se rompen bruscamente debido a la rigidez del material. Las fibras de piña exhiben un comportamiento elástico, traducido en una menor resistencia a la tracción y una mayor deformación (Zainudin et al., 2024). En el caso de la tensión paralela, los tableros de fibra de piña FG obtuvieron valores de resistencia de 8,85 y FD de 16,50 MPa, mientras que para los tableros de madera dieron valores de MG 9,30 y

MD 16,08 MPa. Estos valores muestran una importante elongación de ambos materiales ante fuerzas de tensión la cual esta principalmente determinada por las chapas de madera de melina, siendo esta la que le proporciona rigidez al panel.

Rojas et al., (2004) reportan valores superiores a los 75 MPa de resistencia a la tensión paralela para madera solida de melina. La figura 11 muestra la resistencia a la tensión paralela con respecto al área de esfuerzo que presentan las probetas demostrando que entre menor área de alma presente el tablero mayor es su resistencia a la tensión. Esta relación se debe a que un área mayor brinda mayor posibilidad de que la probeta colapse en esta zona destruyendo la integridad y resistencia del tablero, mientras que una superficie menor causa que la tensión se recargue en las chapas de la madera de melina, la cual presenta valores mucho más elevados de resistencia.

Moncayo et al. (2018) obtienen en su estudio para madera solida de balsa de baja densidad valores en flexión estática de MOR= 8,33 MPa y MOE=1154 MPa, mientras que, Marcillo, (2018) y Ecobalsa (2010) reportan valores MOR en flexión estática de 20,94 MPa y MOE de hasta 4216 MPa. También se exhiben valores de 2200,2 MPa de módulo de elasticidad para balsa y módulo de ruptura de 15,8 MPa (Böhm et al., 2019). En el caso de la madera solida de melina se promedia valores de 8245,5 MPa en MOE, y MOR de 61,9 MPa para plantaciones puras (Hernández et al., 2024).

En el cuadro 3 se exhiben los valores MOR en flexión perpendicular de los tableros, siendo los tableros de madera de balsa los que presentan mayores valores 1,20 a 1,23 MPa y los de fibra de piña 0,48 a 0,79 MPa. Los valores de MOE en flexión perpendicular obtenidos responden a 10,75 MPa para el prototipo MG, MD 8,38 MPa, FD 5,59 y FG 3,63 MPa.

Las figuras 12 y 13 evidencian los valores MOR y MOE en flexión perpendicular al tablero, es decir que la fuerza aplicada en este ensayo beneficia el desenrollado realizado a la madera para la obtención de las chapas, lo cual reduce ampliamente su resistencia a la flexión. Esto se debe principalmente al uso de materiales tan deformables como paneles laminados de madera de balsa con valores muy por debajo de la flexión

de la madera solida de balsa, o la fibra de piña que al presentar un mayor espesor permite en mayor medida la deformación de la melina, disminuyendo los valores de módulo de ruptura y elasticidad.

En el cuadro 3 observamos los valores MOR en flexión paralela de los tableros siendo nuevamente los tableros de madera de balsa los que presentan mayores valores: 30,55 MPa los tableros MD y MG 19,04 MPa. Por su parte los de fibra de piña FD 5,12 y FG 2,16 MPa. Los valores de MOE en flexión paralela responden a 527 MPa para el modelo MD, el valor de MG promedio es 451,93 MPa, FD 25,30 y FG 9,16 MPa. Las figuras 14 y 15 demuestran los valores MOR y MOE obtenidos específicamente para la flexión paralela de las muestras. En estos casos, debido a la disposición de la fibra de la madera de melina, se obtuvo mayor rigidez y estabilidad, permitiendo mayores promedios en los módulos de ruptura y elasticidad.

El módulo de ruptura se cataloga como una medida de esfuerzo que representa la carga máxima de un material que al someterse a flexión llega a su fractura, pero la resistencia al esfuerzo en flexión de un material debe ser considerada hasta el módulo de elasticidad, para efectos de soporte y seguridad (Zambrano et al., 2013). La desviación de los resultados en la determinación de las propiedades de resistencia elástica puede deberse a desviaciones en el contenido de humedad, densidades de la madera y fibra, la presencia de defectos o procedimientos inadecuados en la producción de los tableros. (Shupik & Filippov, 2023). También cabe recalcar que el procedimiento de fabricación de los tableros no fue óptimo, debido al desconocimiento durante los procedimientos, la calidad de la materia prima y la cantidad de productos utilizados durante la producción de los distintos modelos. Por lo que se debe de realizar diferentes procedimientos y cantidades óptimas para garantizar mejores cualidades de resistencia de los materiales y tableros construidos.

6.3 Aislación acústica

La figura 16 evidencia el sonido capturado para cada uno de los prototipos de tableros aislantes analizados hasta los 8000 Hz. Como lo muestra la figura 17 los valores SAC obtenidos para los 4 modelos en las distintas frecuencias, se evidencia que en las frecuencias de 0-2000 Hz los prototipos de madera de balsa fueron los que obtuvieron mayores resultados y en las frecuencias de 4000-8000 los tableros de piña tuvieron un mejor coeficiente de absorción del sonido. La figura 19 muestra el coeficiente de reducción del sonido de cada prototipo, donde se determina que los tableros de madera laminada de balsa tienen valores significativamente mayores a los obtenidos por los tableros de fibra de piña.

Mat et al., (2023a) determinan paneles de 100 % fibras de piña con densidades de 285 y 295 kg/m³ y espesores de 10 y 20 mm que obtiene valores de NRC de 0,17 y 0,48 respectivamente en las frecuencias de 250 a 2000 Hz. En comparación en el caso de los tableros FD y FG utilizados en este estudio con espesores similares, promediados en 10 y 17 mm, con densidades de 300 y 210 kg/m³ respectivamente, se obtuvieron valores NRC de 0,22 y 0,23 (ver el cuadro 4) para las mismas frecuencias siendo valores relativamente más bajos. Sin embargo, las densidades de los paneles o almas de dichos prototipos promedian los 160 y 100 kg/m³, lo cual demuestra que con una mayor densidad se obtendrían mejores valores de aislación acústica. En el estudio de Mat et al., (2023b) para paneles confeccionados 100 % con fibras a partir de las hojas de la piña (PALF), con un espesor de 20 mm y una densidad de 0,295 g/cm³, se registra un coeficiente de reducción del sonido NRC de 0,48, promediando los valores SAC o el coeficiente absorción del sonido en las frecuencias 250, 500, 1000, 2000 Hz, concluyendo que el material PALF presenta un excelente desempeño como absorbente acústico y un alto potencial para remplazar los materiales acústicos sintéticos.

Kassim et al., (2023) demuestran en sus estudios un aumento de los coeficientes SAC y NRC con respecto a la densidad de los paneles de fibra de piña, determinando una densidad ideal entre 485 a 518 kg/m³ y un espesor de 20 mm para paneles 100 % PALF. La figura 18 enseña las curvas SAC para los prototipos de 250 a 2000 Hz, donde los

tableros de madera de balsa presentan mayores curvas de absorción siendo los materiales más densos en comparación con los paneles de fibra.

Los valores de absorción del sonido de la madera solida son bajos comparados con paneles de fibras naturales. Los valores de absorción de tableros tipo sándwich a base de madera de balsa varían según el espesor del núcleo. Al igual que la disposición de la madera en el tablero tiene una amplia influencia en la absorción acústica, el material utilizado como revestimiento y su espesor también son variables que afecta sus propiedades de aislamiento. (Sharma et al., 2020; Kumar et al. 2024)

Las estructuras tipo sándwich de origen biológico tienen una amplia gama de aplicaciones industriales debido a sus características superiores, disponibilidad, facilidad de fabricación, peso ligero y cualidades notables (Bharathi et al., 2024). Por lo tanto, los tableros de madera de balsa y fibra de piña pueden obtener significantes incrementos en sus propiedades acústicas con moderados cambios en su disposición y estructura. (Bharathi et al., 2024)

6.4 Aislamiento térmico

La conductividad térmica de un material depende de una variedad de factores como su composición, estructura, densidad y temperatura. Materiales como la madera, fibras o espumas presentan una baja conductividad térmica debido a su naturaleza porosa y a la presencia de bolsas de aire atrapadas (Cárdenas et al., 2024). La madera de balsa se considera un sólido de baja conductividad de calor que permite el soporte mecánico de estructuras internas (Sadegh y Worek, 2018). En el cuadro 5 se evidencian los resultados para cada prototipo donde se estima una conductividad térmica de 0,053 W/mK para los tableros de fibra de piña delgados FD, 0,056 W/mK para FG, siendo menor el valor del tablero delgado explicado por la mayor densidad del panel de fibra de piña. Los valores para los tableros de madera laminada de balsa son de 0,107 y 0,082 W/mK para los modelos MD y MG respectivamente, en la cual se determina una menor transferencia de calor con relación al espesor de la madera de balsa.

Haciendo uso de la norma ASTM E1225 se reportan valores de conductividad térmica para muestra de 4 mm de espesor de fibra de piña de 0,1746 W/mK a 35 °C, determinando un decrecimiento de la conductividad térmica de materiales fibrosos conforme la temperatura aumenta. Esto difiere con los datos obtenidos en este estudio en los cuales la conductividad térmica aumenta proporcional a la temperatura. Gunawan et al., (2024) presentan valores poco más elevados a los obtenidos de 0,0593 y 0,0554 W/mK a 30 °C para tableros de 17 y 10 respectivamente. Kumfu & Jintakosol (2012) informan que para paneles de 9 mm en su espesor y densidades de 338 y 429 kg/m³ la conductividad térmica fue de 0,057 y 0,071 W/mK, determinando una buena factibilidad de los paneles a partir de fibras de las hojas de la piña para la conservación de energía en la edificación, siendo datos similares a los obtenidos en este estudio con densidades de tableros menores. Los valores bajos de conductividad térmica utilizados en la construcción moderna son inferiores a 0,1 W/mK, los materiales con valores inferiores a 0,07 W/mK se consideran aislantes térmicos (Cárdenas et al., 2024). Cruz (2022) dice que un material puede categorizarse como aislante térmico cuando tiene un coeficiente de conductividad térmica menor a 0,060 W/mK, evidenciando el buen aislamiento térmico de los tableros de fibra de piña realizados. En la figura 19 se observa la conductividad térmica de los tableros fabricados en un rango de 10 a 30 °C, mientras que en los anexos 1 a 4 se evidencia el desempeño de cada tablero durante la prueba de conductividad térmica realizada.

El rendimiento de los sistemas de materiales de aislamiento térmico eficaces en los edificios se basa en el ahorro de energía, lo que significa que el material tiene que presentar una baja conductividad térmica o una alta resistencia térmica. Los tableros con buena protección térmica deben tener baja conductividad térmica, alta densidad y capacidad calorífica específica. Con el uso adecuado de materiales aislantes se espera conseguir una gran variedad de efectos, como la reducción del coste energético y la mejora de la eficiencia de fabricación (Cárdenas et al., 2024).

7 CONCLUSIONES

La densidad de los tableros de fibra de piña de 12,7 mm (FD) es de 301 kg/m³, la densidad del panel o alma promedio 160 kg/m³ y el porcentaje de absorción de agua supera el 100 % causando un hinchamiento medio de 8,5 %. Los tableros de fibra de piña con 19,1 mm de espesor obtuvieron 210 kg/m³ de densidad, y los paneles 100 kg/m³ lo cual aumento su absorción de agua al 127 %, pero disminuyo su hinchamiento medio a 4 %. El contenido de humedad de ambos prototipos se aproxima al 12 %. Una mayor densidad del panel de fibra de piña puede llegar a disminuir su porcentaje de absorción de agua, pero causa un mayor hinchamiento de su espesor.

La densidad de los tableros de madera de balsa es de 12,7 mm (MD) es de 266 kg/m³, la densidad del panel o alma promedio 140 kg/m³ y el porcentaje de absorción de agua supera el 60 % causando un hinchamiento medio de 1,53 %. Los tableros de madera de balsa con 19,1 mm de espesor obtuvieron 222 kg/m³ de densidad, y los paneles 160 kg/m³ lo cual aumento su absorción de agua al 69 %, pero disminuyo su hinchamiento aproximado 1 %. El contenido de humedad de ambos prototipos se aproxima al 12 %.

Los tableros de madera de balsa presentan una mayor resistencia sobre los tableros de fibra de piña en todas las propiedades mecánicas evaluadas. Esto se debe a la mayor rigidez y dureza del material de núcleo. Sin embargo, el material de revestimiento utilizado es el que proporciona principalmente las propiedades mecánicas al tablero sándwich.

La utilización de ácido poliláctico es un adhesivo que presenta mucha versatilidad de aplicaciones, ya que es biodegradable, es obtenido de fuentes renovables, no toxico durante su procesamiento y uso, además de que contribuye a la disminución de residuos plásticos.

Los tableros de fibra de piña y los tableros de madera de balsa realizados en este estudio presentan un aislamiento acústico superior a aislantes a base de polímeros que se distribuyen en el mercado. Sin embargo, los valores SAC y NRC de los prototipos

estudiados no cumplen con los valores mínimos exigidos para ser considerados un buen reductor de sonido de 0,45 en NRC.

La conductividad térmica de los tableros con alma de madera laminada de balsa es aceptable para valores utilizados en la construcción moderna inferiores a 0,1 W/(mK), con 0,082 y 0,107 W/mK para los modelos MG y MD respectivamente. Se observa que los valores de conductividad aumentan con respecto al grosor del material. Los tableros a partir de fibra de piña presentan un buen aislamiento térmico con una conductividad de 0,053 a 0,056 W/mK para los modelos FD y FG, permitiendo ser considerados como aislantes térmicos, siendo la densidad de los paneles el parámetro con mayor influencia.

RECOMENDACIONES

Estandarizar los procedimientos para cada tipo de tablero y utilizar materias primas en óptimas condiciones es necesario para disminuir la varianza entre los tableros y lograr una mayor factibilidad en la producción.

Escalar las dimensiones comerciales de tableros aislantes para construir paredes y hacer pruebas a escala real, para una correcta verificación de los datos obtenidos.

Aumentar la densidad de los paneles de fibra de piña beneficiaría a la aislación acústica y térmica de los tableros.

Aumentar la cantidad de probetas de ensayos beneficiaría a una mayor robustez de los datos obtenidos.

Investigar otros estudios sobre muestras con distintas densidades y distintos espesores para conocer el efecto en la aislación tanto acústica como térmica de los materiales y expandir el conocimiento adquirido en este estudio.

8 REFERENCIAS

- Acuña, P. (2021). *High performance flame retardant rigid polyurethane foam with high thermal insulation* (Doctoral dissertation, Universidad Carlos III de Madrid).
- Ángulo, I. (2021). *Fibras naturales y su incidencia en la calidad del sonido en paneles acústicos para un estudio de grabación*. [Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de diseñador de interiores]. Universidad Laica Vicente Rocafuerte de Guayaquil.
- Apuy, E (2021). Prospección de oportunidades comerciales para la exportación de madera de balsa en Costa Rica. PROCOMER https://sistemas.procomer.go.cr/DocsSEM/84071DC3-B723-4254-AF7C-C32B5B0B04B8.pdf?utm_source=PRENSA+Nacional&utm_campaign=5686b0ed48ESTUDIO_DE_PRODUCTOS_DE_HIGIENE_Y_CUIDADO_PERSONAL&utm_medium=email&utm_term=0_490ca65a8d-5686b0ed48-
- ASTM-American Society for Testing and Materials (2020a) Standard Test Methods for Direct Moisture Content Measurement of Wood and Wood-Based Materials. (ASTM D4442-20). *ASTM International*.
- ASTM-American Society for Testing and Materials (2020b) Standard Test Methods for Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials (ASTM D1037-12). *ASTM International*.
- ASTM-American Society for Testing and Materials (2022) Density and Specific Gravity (Relative Density) of Wood and Wood-Based Materials¹ (ASTM D2395-17). *ASTM International*.
- Atahuachi Layme, G. M., & Carcausto Quispesayhua, Y. N. (2018). *Aislante termoacústico a base de Stipa Ichu para atenuar el ruido y cambios drásticos de temperatura en viviendas de sectores en expansión urbana de la ciudad de Puno*. [Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de ingeniero civil]. Universidad Nacional del Altiplano.

- Attal, E; Côté, N; Shimizu, T. & Dubus, B. (2019). Sound absorption by green walls at normal incidence: physical analysis and optimization. *Acta Acustica united with Acustica*, 105(2), 301-312.
- Bardak, T; Tankut, A. N; Tankut, N; Aydemir, D; & Sozen, E. (2017). The bending and tension strength of furniture joints bonded with polyvinyl acetate nanocomposites. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 19(1), 51-62.
- Bharathi, M., Karthikeyan, S., Sankar, I., & Siva, I. (2024, August). Acoustic properties of PVC core natural fiber sandwich structure. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 3022, No. 1). AIP Publishing.
- Böhm, M., Brejcha, V., Jerman, M., & Černý, R. (2019, December). Bending characteristics of fiber-reinforced composite with plywood balsa core. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2186, No. 1). AIP Publishing.
- Borrega, M., & Gibson, L. J. (2015). Mechanics of balsa (*Ochroma pyramidale*) wood. *Mechanics of Materials*, 84, 75-90. <https://10.1016/j.mechmat.2015.01.014>
- Campozano, I. & Riera, M. (2022) Ácido poliláctico: una revisión de los métodos de producción y sus aplicaciones. *Publicaciones en Ciencia y tecnología*. 16(1), 42-53
- Cárdenas-Oscanoa, A. J., Tene Tayo, J. L., Huang, C., Huang, C., & Euring, M. (2024). Discovering Natural Fiber-Insulation Boards and Natural Adhesives, Focused on a Polylactic Acid (PLA) Application—a Review. *Journal of Natural Fibers*, 21(1), 2343371.
- Chandrasekar, M; Senthilkumar, K; Jawaid, M; Mahmoud, M; Fouad, H. & Sain, M. (2022). Mechanical, morphological and dynamic mechanical analysis of pineapple leaf/washingtonia trunk fibres based biophenolic hybrid composites. *Journal of Polymers and the Environment*, 30(10), 4157-4165.
- Criado, D y Franco, W. (2019). Diseño y construcción de un tubo de impedancia basado en la norma ISO10534-2:2001 para la determinación del coeficiente de absorción

- acústica para materiales aislantes. [Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de ingeniero mecánico] Universidad Pontificia bolivariana.
- Cruz, M (2022) *Paneles termoacústicos sostenibles de totora como módulos de cielo falso para viviendas rurales en la ciudad de Puno*. [Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de ingeniero civil]. Universidad nacional del Altiplano.
- Cury K; Aguas, Y; Martínez; A; Olivero R y Chams, L. (2017). Residuos agroindustriales su impacto, manejo y aprovechamiento. *Revista Colombiana de Ciencia Animal - RECIA*, 9(S1), 122–132. <https://doi.org/10.24188/recia.v9.nS.2017.530>
- Díaz, D. (2023). Evaluación del nivel de ruido a los que están expuestos los ayudantes de unidad productiva de una ladrillera para la implementación de medidas de control–Arequipa–2022.
- Dicovski, L. (2010). Estadística básica para ingenieros. Unidad 3: Introducción al diseño experimental.
- Do, N. H., Tran, V. T., Tran, Q. B., Le, K. A., Thai, Q. B., Nguyen, P. T., ... & Le, P. K. (2021). Recycling of pineapple leaf and cotton waste fibers into heat-insulating and flexible cellulose aerogel composites. *Journal of Polymers and the Environment*, 29, 1112-1121.
- Ecobalsa Ficha técnica de madera de balsa. Obtenido desde: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/52765/ANEXO%204.2.%20-FICHA%20T%C3%89CNICA%20MADERA%20BALSA.pdf?sequence=8>
- Espejo, H (2019) Sistema de absorción acústico para muros a partir cascarilla de arroz, para disminuir la reflexión de sonido dentro de los espacios. [Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de Arquitecta] Universidad La Gran Colombia.
- Farias, R; Martínez, C; Cotes, T; Andreola, F; Lancellotti, I; & Barbieri, L. (2017). Valorization of agro-industrial wastes in lightweight aggregates for agronomic use:

- Preliminary study. *Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ)*, 16(8).
- Feng, Y., Qiu, H., Gao, Y., Zheng, H., & Tan, J. (2020). Creative design for sandwich structures: A review. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 17(3), 1729881420921327.
- Galos, J; Das, R; Sutcliffe, M. P; & Mouritz, A. P. (2022). Review of balsa core sandwich composite structures. *Materials & Design* 221, 111013. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111013>
- Gobierno de Costa Rica (2018) Plan nacional de descarbonización 2018-2050. Recuperado desde: <https://cambioclimatico.go.cr/wp-content/uploads/2019/02/PLAN.pdf>
- González, H; Salazar, E; Cabrera, C. (2008). Cálculo del coeficiente de reducción de ruido (NRC), de materiales, utilizando una cámara de insonorización. *Scientia et Technica*, 14(38), 119-124.
- Gunawan, A., Putra, N., Sofia, E., & Sukamo, R. (2024, April). Determining the thermal conductivity of natural fibres with axial flow method. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2836, No. 1). AIP Publishing.
- Guzmán, G. (2017). *Paneles aislantes de sonido elaborados con concreto y adición de polvo de llanta*. [Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero civil]. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Hernández-Álvarez, E., Ruiz-Blandon, B. A., Gómez-Cárdenas, M., & Quiñonez-Barraza, G. (2024). Análisis tecnológico en *Gmelina arborea* Roxb. proveniente de rodales juveniles puros y mezclados en México. *Colombia forestal*, 27(2).
- Hernández, W; Badilla, Y; Esquivel, E, & Murillo O. (2021). Comportamiento de clones de *Gmelina arborea* Roxb. en condiciones de suelo ácidos. *Revista de Ciencias Ambientales*, 55(2), 229-249.

- Infante, A. (2017). *Estudio del biocompuesto Ácido poliláctico-fibra de hoja de piña*. [Trabajo de Grado presentado como requisito para optar por la Licenciatura en Ingeniería Ambiental]. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- IPCC (2022) Climate Change 2022 Mitigation of climate change, Summary for policymakers. *Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*
- Kassim, A. S. F. A., Yahya, K., Haron, Z., Darus, N., Mat, T. N. F. T., & Galip, N. S. (2023, November). Acoustic characteristics of composite board from pineapple leaf fibers and rubber latex. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2959, No. 1). AIP Publishing.
- Kotteesvaran, B; Vijayakumar, S; Suresh, G. & Vimalanathan, P. (2024, June). A review on: Technologists interest on natural fibers. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 3122, No. 1). AIP Publishing.
- Kumar, P; Priya, K; Kumar, N; Thakur, R. K. & Vikram, V. (2024, August). Sound absorption characteristics of balsa cored asymmetric sandwich composite material. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 3178, No. 1). AIP Publishing.
- Kumfu, S., & Jintakosol, T. (2012). Thermal insulation produced from pineapple leaf fiber and natural rubber latex. *Advanced Materials Research*, 506, 453-456.
- Lanco (2016a) *Grip-Bond-2-WA502-TDS-ESP*. <https://www.lancopaints.com/usa/es/>
- Lanco (2016b) *Grip-Bond-4-WA844-TDS-ESP*. <https://www.lancopaints.com/usa/es/>
- Lawrence, M. (2015). Reducing the environmental impact of construction by using renewable materials. *Journal of Renewable Materials*, 3(3), 163–174. <https://doi.org/10.7569/JRM.2015.634105>
- Lira, L; González, O; Méndez, E (2008) Medición de la Conductividad Térmica de Algunos Materiales Utilizados en Edificaciones. Simposio de metrología. pp. 1-5

- Marcillo, K. (2018). *Análisis del aprovechamiento acústico de los paneles elaborados con balsa y su aplicación en ambientes interiores* (Bachelor's thesis, Guayaquil: ULVR, 2018.).
- Mahdi, Z. R. (2024). Thermal performance of buildings and pavements materials in semi-arid regions. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 3249, No. 1). AIP Publishing.
- Martínez, L. (2021). *Propuesta de paneles aislantes termoacústicos divisorios a base de cáñamo y resina de pino, como alternativa al uso de polímeros sintéticos en construcción*. [Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de Arquitecta] Universidad La Gran Colombia.
- Martínez, A. (Última edición: 14 de junio de 2023 a las 5:18 pm). Definición de Acústica. Recuperado de: <https://conceptodefinicion.de/acustica/>. Consultado el 26 de mayo de 2024
- Martínez, H. (2015). "Melina (*Gmelina arborea* Roxb.): condiciones para su cultivo "Fomento de la reforestación comercial para la mejora y conservación de las reservas de carbono". *Banco Mundial, Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO) y Oficina Nacional Forestal (ONF). Moravia, San José.*
- Martínez, M & Almeida, F. (2017). Caracterización dinámica de la Madera de Balsa de Ecuador. *Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, 157.*
- Martins, R; Barbirato, G; Campos, L; & Fiorelli, J. (2023). OSB sandwich panel with undulated core of balsa wood waste. *Maderas. Ciencia y tecnología, 25(25) 1-10.*
- Mat, T. N. F. T; Galip, N. S; Yahya, K.; Haron, Z; Darus, N; Redzuan, I. H. & Kassim, A. S. F. A. (2023a). Effect of pineapple leaf fibre composite material thickness on sound absorption performance. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2959, No. 1). AIP Publishing.
- Mat, T. N. F. T; Yahya, K; Haron, Z; Darus, N; Redzuan, I. H; Galip, N. S; Kassim, S. F. A. & Ibrahim, Z. (2023b). Acoustic performance of pineapple leaf fibres bonded with

- natural rubber latex as a sound absorber. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2959, No. 1). AIP Publishing.
- Moncayo, G., Narváez, C; Villacis, N. & Melo, J. G. (2018, June). Caracterización de las propiedades mecánicas de la madera de balsa (*Ochroma Pyramidale*) Ecuatoriana. In *Congreso de Ciencia y Tecnología ESPE* (Vol. 13, No. 1).
- Monteiro, A.; Ankrah, J.; Madureira, H.; Pacheco, M.O. (2022) Climate Risk Mitigation and Adaptation Concerns in Urban Areas: A Systematic Review of the Impact of IPCC Assessment Reports. *Climate* 2022, 10, 115. <https://doi.org/10.3390/cli10080115>
- Moya, R., 2007. Industrialización y comercialización de madera proveniente de plantaciones forestales en Costa Rica. *Recursos Naturales y Ambiente* 49:154-162.
- Moya, R. & Camacho, D. (2014). Production of natural fiber obtained from the leaves of pineapple plants (*Ananas comosus*) cultivated in Costa Rica. In: Rehman, K., Mohammad, J., Umer, R. (Eds.) *Biomass and Bioenergy-Processing and Properties*. pp. 111-124. Springer International Publishing Switzerland
- Moya, R., Tenorio, C., Puente-Urbina, A., Rosales-López, C., & Vega-Baudrit, J. (2023). Production of Paper Using Biopulping of Pineapple Leaves Fibers (PALF) Followed by Chemical and Xylanase-Enzymatic Processing. *Journal of Natural Fibers*, 20(1), 2163025.
- Moya, R. & Tenorio, C. (2020) material de apoyo didáctico para cursos de botánica y propiedades de la madera: propiedades físicas. Instituto tecnológico de Costa Rica
- Muhammad, A. H., Trisnadewi, T., Janitra, G., & Putra, N. (2024, October). Development of wood material for form-stable phase change material (FSPCM) as building insulation. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 3090, No. 1). AIP Publishing.

- Muñoz, F & Moya, R (2018) Effect of nanoclay-treated UF resin on the physical and mechanical properties of plywood manufactured with wood from tropical fast growth plantations. *Maderas Ciencia y tecnología*. 20(1) 11-24
- Nicolalde, K & Revelo, A. (2018). *Caracterización mecánica y térmica de paneles tipo sánduche obtenidos a base de residuos de fibra de coco* (Bachelor's thesis, Quito, 2018.).
- Palma, L. A; Quispe, S. D; Palacios, F. G. (2023). Ensayo de dureza a composite elaborado a partir de fibras y aglutinantes naturales. *Revista Social Fronteriza*, 3(5), 63-76.
- Patel, M., Sonkar, L., & Patel, S. (2024). The honeycomb cell wall thickness effect on sandwich panels' blast performance. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 3111, No. 1). AIP Publishing.
- Porras, M; Muñoz, C; Gil, A; & Quintana, G. (2012). Obtención de espumas de poliuretano con materiales lignocelulósicos. *Revista Investigaciones Aplicadas*, 6(2), 93-102.
- Quirós, S. (2015). Modelos de volumen comercial, perfil de fuste y crecimiento para plantaciones clonales de *Gmelina arborea* Roxb. ex Sm. en Costa Rica.
- Rivero, V. (2016). *Análisis medioambiental de los aislamientos térmicos en la construcción*. [Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de Arquitectura técnica] Universidade da Coruña.
- Rodríguez, T., & Prunier, D. (2020). Extractivismo agrícola, frontera y fuerza de trabajo migrante: La expansión del monocultivo de piña en Costa Rica. *Frontera norte*, 32.
- Rodríguez, L. y Meza, C. (2018). La construcción sostenible frente a la mitigación del cambio climático. MODULO ARQUITECTURA-CUC, vol. 21, no. 1, pp. 9-22. DOI: 10.17981/mod.arq.cuc.18.2.2018.01
- Rodríguez, D (2019) Los objetivos de descarbonización y el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima: una valoración. *Presupuesto y Gasto Público*. 79-101

- Rojas, J. C. C., Iwakiri, S., Trianoski, R., & Mora, H. E. G. (2020). Uso de residuos de procesos de transformación secundaria de tres especies tropicales en la fabricación de paneles encolados lateralmente. *Scientia Forestalis*, 48(125), e3168. <https://doi.org/10.18671/scifor.v48n125.20>
- Rojas, F; Arias, D; Moya, R; Meza, A; Murillo, O. & Arguedas, M. (2004). Manual para productores de melina *Gmelina arborea* en Costa Rica. *Cartago, Costa Rica, Centro de Investigación en Integración Bosque Industria de la Escuela de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica*.
- Sadegh, A. M.; Worek, W. M. (2018) Cryogenics Chap. 11.2 in *Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers*. 12th edition. New York: McGraw-Hill
- Sánchez, V; Bustos, I; Pizarro, K (2023). Análisis de las exportaciones de madera de balsas y su influencia en ámbitos económico-ambiental. *Polo del Conocimiento: Revista científico-profesional*, 8(11), 1275-1302.
- Schulte, M; Lewandowski, I; Pude, R; Wagner, M. (2021) Comparative life cycle assessment of bio-based insulation materials: Environmental and economic performances. *GCB Bioenergy*, 13: 979–998
- Secretarías distritales de ambiente, hábitat y planeación. (2015) Política pública ecourbanismo y construcción sostenible. Documento técnico de soporte.
- Sharma, S. K., Shukla, S. R., & 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, 66-72.
- Shupik, P. A., & Filippov, A. A. (2023, September). Determination of mechanical characteristics of wooden composite at three-point bending with different ratio of balsa and lime wood. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2899, No. 1). AIP Publishing.
- Sibaly, S., & Jeetah, P. (2017). Production of paper from pineapple leaves. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(6), 5978-5986.

- S&P (2018) Materiales aislante térmicos: tipos y aplicaciones. Actualizado en mayo del 2023. Recuperado de: <https://www.solerpalau.com/es-es/blog/materiales-aislantes-termicos/>
- Tenorio, C; Moya, R; Camacho, D (2012) Propiedades físico-mecánicas de tableros terciados contruidos con especies tropicales de plantación para uso estructural.
- Tüfekci, M; Öztekin, V; Pir, İ; Alioğlu, M; Dikicioğlu, C; Dikicioğlu, A: & Tüfekci, E. (2023). Low strain rate mechanical performance of balsa wood and carbon fibre-epoxy-balsa sandwich structures. *Composites Part C: Open Access*, 12, 100416.
- Vahedi, N., Wu, C., Vassilopoulos, A. P., & Keller, T. (2020). Thermomechanical characterization of a balsa-wood-veneer structural sandwich core material at elevated temperatures. ELSEVIER. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117037>
- Vargas, A; Morales, M; Watler, W; Vignola, R. (2018). CULTIVO DE PIÑA EN COSTA RICA.
- Vehola, A., Hurmekoski, E., Lähtinen, K., Ruokamo, E., Roos, A., Toivonen, R., & Toppinen, A. (2022). Citizen beliefs concerning wood as a construction material under extreme weather events. *Canadian Journal of Forest Research*, 52(9), 1266–1279. <https://doi-org.ezproxy.itcr.ac.cr/10.1139/cjfr-2022-0108>
- Velázquez, M. (2016). *Materiales aislantes sostenibles*. [Trabajo de Grado]. Universidad de Extremadura.
- Weather Spark (2016a) El clima y el tiempo promedio en todo el año en Guácimo, Costa Rica. Revisado el 9 de mayo del 2024. Recuperado de: <https://es.weatherspark.com/y/16162/Clima-promedio-en-Gu%C3%A1cimo-Costa-Rica-durante-todo-el-a%C3%B1o>
- Weather Spark (2016b) El clima y el tiempo promedio en todo el año en Pital, Costa Rica. Revisado el 9 de mayo del 2024. Recuperado de:

<https://es.weatherspark.com/y/15519/Clima-promedio-en-Pital-Costa-Rica-durante-todo-el-a%C3%B1o>

Weather Spark (2016c) El clima y el tiempo promedio en todo el año en Cartago, Costa Rica. Revisado el 9 de mayo del 2024. Recuperado de: <https://es.weatherspark.com/y/16154/Clima-promedio-en-Cartago-Costa-Rica-durante-todo-el-a%C3%B1o>

Zainudin, A. S., & Othman, A. R. (2024, June). Tensile properties of pineapple leaf fibre reinforced polypropylene (PP) and polylactic acid (PLA). In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2991, No. 1). AIP Publishing.

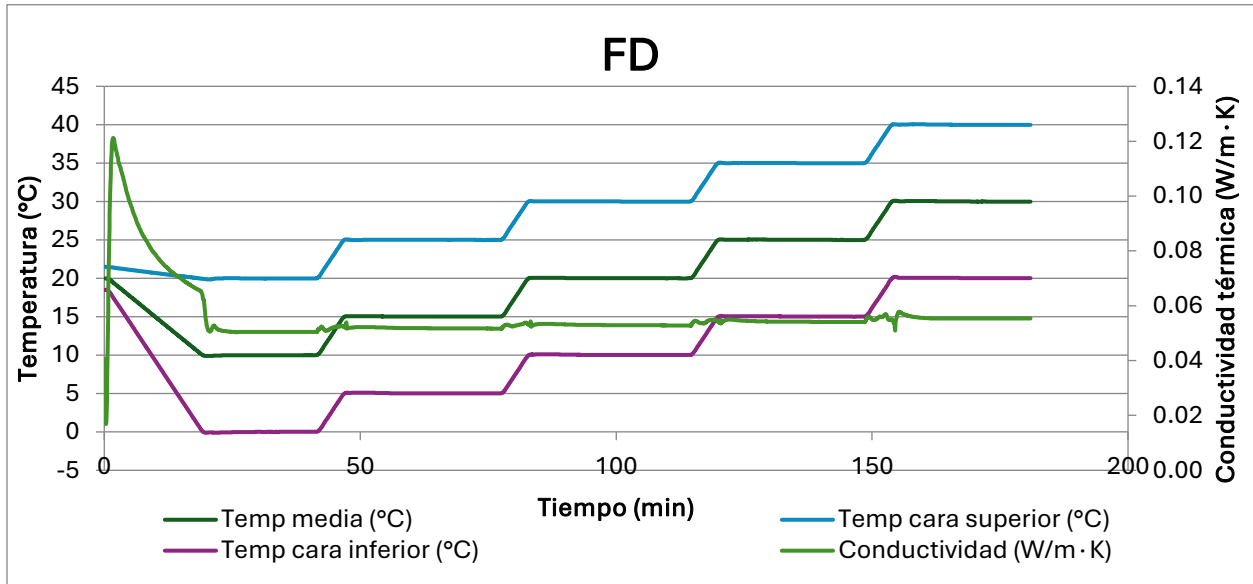
Zambrano, L; Moreno, P; Muñoz, F; & Valero, S (2013) Tableros de partículas fabricados con residuos industriales de madera de *Pinus patula*. *Madera y Bosques* 19(3), 2013:65-80 DOI: 10.21829/myb.2013.193328

Zhang, H. N., Sun, W. S., Sun, G. M., Liu, S. H., Li, Y. H., Wu, Q. S., & Wei, Y. Z. (2016). Phenological growth stages of pineapple (*Ananas comosus*) according to the extended Biologische Bundesantalt, Bundessortenamt and Chemische Industrie scale. *Annals of Applied Biology*, 169(2), 311-318

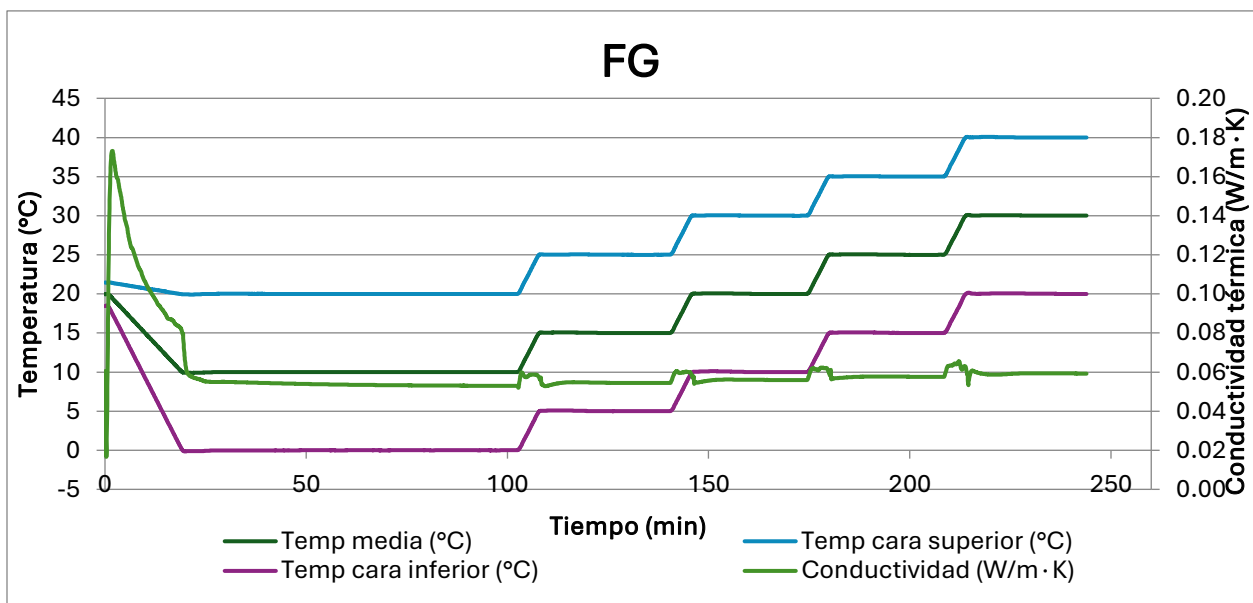
Zhao, Y; Qu, A; Yang, M; Dong, H; Ge, Y; Li, Q; Liu, Y; Zhang, L; Liu, Y; Yang, L; Song, Y & Zhao, J. (2024). Modified balsa wood with natural, flexible porous structure for gas storage. *Applied Energy*, 353, 122026.

9 ANEXOS

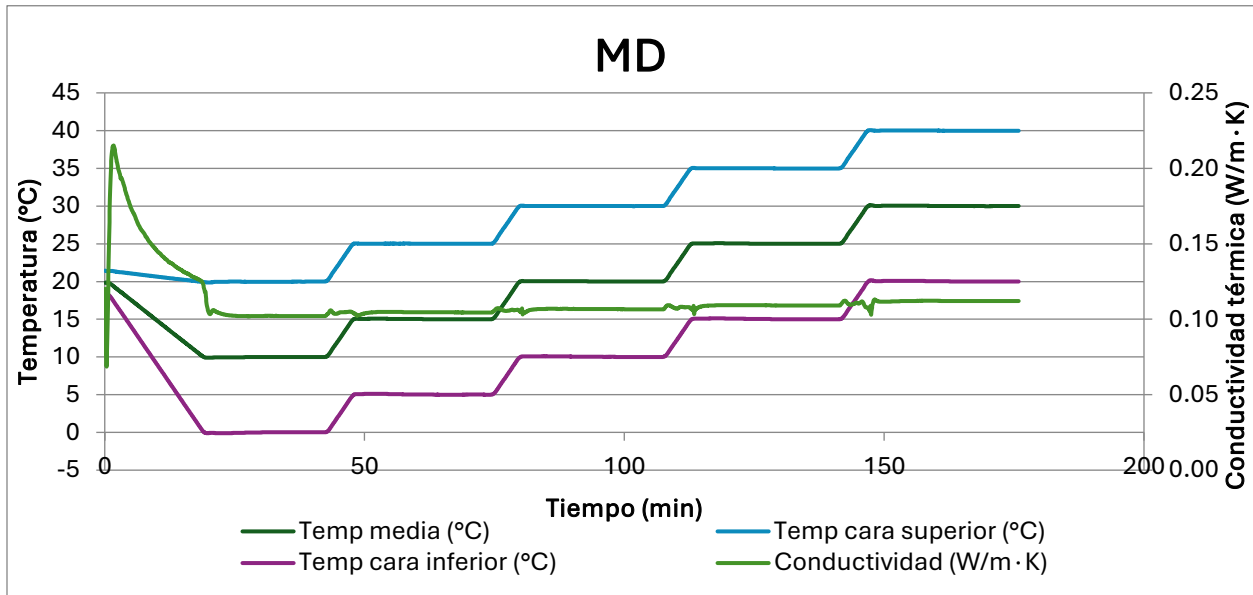
Anexo 1. Grafica de temperaturas durante el ensayo de conductividad térmica al prototipo de fibra de piña de menor espesor (FD).



Anexo 2. Grafica de temperaturas durante el ensayo de conductividad térmica al prototipo de fibra de piña de mayor espesor (FG).



Anexo 3. Grafica de temperaturas durante el ensayo de conductividad térmica al prototipo de madera laminada de balsa de menor espesor (MD).



Anexo 4. Grafica de temperaturas durante el ensayo de conductividad térmica al prototipo de madera laminada de balsa con mayor espesor (MG).

