

Tableros a base de chapas de madera de Pino radiata reforzados con fibras de ingeniería y adhesivos*

Radiata pine veneer-based panels reinforced with engineered fibers and adhesives

Mario Núñez-Decap^{1,2,*} <https://orcid.org/0000-0002-4627-5750>

Marcela Vidal-Vega¹ <https://orcid.org/0000-0001-6751-2404>

Boris Moya-Rojas¹ <https://orcid.org/0009-0006-2374-5621>

Camila Opazo-Carlsson¹ <https://orcid.org/0000-0003-2558-3209>

Gerson Rojas-Espinoza³ <https://orcid.org/0000-0002-6369-6936>

¹Universidad del Bío-Bío. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Concepción, Chile.

²Pontificia Universidad Católica de Chile. Centro Nacional de Excelencia para la Industria de la Madera (CENAMAD). Santiago, Chile.

³Universidad del Bío-Bío. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería de Procesos y Bioproductos. Concepción, Chile.

*Autor de correspondencia: mnunez@ubiobio.cl

*Este artículo es una versión revisada por pares del trabajo presentado previamente en el III Congreso Ibero- Latinoamericano de la Madera en la Construcción (CIMAD), celebrado en Madrid, España en junio 2024. Editora asociada: Laura Moya

Resumen:

Con el objetivo de potenciar el uso de la madera en la construcción, se busca mejorar las propiedades físicas y mecánicas de los tableros contrachapados y madera microlaminada a base de pino radiata, una especie que presenta bajas prestaciones físico-mecánicas y de durabilidad, a través del refuerzo de estos productos con fibras de ingeniería y adhesivos. Por ello, se analiza el comportamiento de la fibra de basalto junto a un adhesivo epóxico y de polivinil de acetato, a escala de laboratorio, comparándolo con la fibra de carbono, que es más comúnmente usada con este fin, pero que presenta desventajas como su alto precio. Para el estudio, se realizaron los siguientes ensayos, de acuerdo con las metodologías descritas en las respectivas normativas: rugosidad superficial, hinchamiento, flexión estática y dureza Janka. Los resultados obtenidos de los tableros reforzados se compararon con tableros patrón no reforzados, lo que evidenció una disminución en el hinchamiento de hasta un 100 % en madera microlaminada. En términos de rigidez y resistencia a la flexión, hubo un aumento del 49 % en el MOR en tableros contrachapados reforzados con fibra de carbono y resina epóxica, y del 30 % en el MOE y 38 % en el MOR en madera microlaminada reforzada con fibra de carbono y resina epóxica. Además, se observó un aumento del 35 % y 41 % en la resistencia a la dureza Janka en los tableros contrachapados reforzados con fibra de carbono y acetato de polivinilo, y en la madera microlaminada reforzada con fibra de carbono y resina epóxica, respectivamente. El estudio realizado permitió obtener conclusiones importantes respecto del uso de fibras de ingeniería como reforzamiento. En primer lugar, se comprobó que, al reforzar los tableros, las propiedades físicas y mecánicas aumentaron en comparación con un tablero sin reforzar. En segundo lugar, se observó, en algunos casos, un comportamiento igual o superior del refuerzo con fibra de basalto en comparación con el de fibra de carbono; la recomendación dependerá del tipo de uso que se le quiera dar al tablero.

Palabras clave: Acetato de polivinilo, fibra de basalto, fibra de carbono, madera microlaminada, resina epoxi, tablero contrachapado.

Abstract:

In order to promote the use of wood in construction, this study aims to improve the physical and mechanical properties of plywood and laminated veneer lumber (LVL) made from radiata pine, a species that exhibits low physical-mechanical performance and durability. This improvement is pursued through the reinforcement of these products with engineered fibers and adhesives. Therefore, the behavior of basalt fiber combined with epoxy and polyvinyl acetate adhesives is analyzed at a laboratory scale, and compared to carbon fiber, which is more commonly used for this purpose but has disadvantages such as its high cost. The following tests were conducted in accordance with the methodologies described in the respective standards: surface roughness, swelling, static bending, and Janka hardness. The results obtained from the reinforced boards were compared to unreinforced standard boards, showing a swelling reduction of up to 100% in LVL panels. In terms of stiffness and bending strength, there was a 49% increase in MOR in plywood reinforced with carbon fiber and epoxy resin, and a 30% increase in MOE and 38% in MOR in LVL panels reinforced with carbon fiber and epoxy resin. Additionally, a 35% and 41% increase in Janka hardness was observed in plywood reinforced with carbon fiber and polyvinyl acetate, and in LVL panels reinforced with carbon fiber and epoxy resin, respectively. The study led to important conclusions regarding the use of engineered fibers as reinforcement. Firstly, it was confirmed that reinforcing the boards resulted in improved physical and mechanical properties compared to unreinforced panels. Secondly, in some cases, basalt fiber showed equal or even superior performance when compared to carbon fiber; the recommendation will depend on the intended use of the panel.

Keywords: Polyvinyl acetate, basalt fiber, carbon fiber, epoxy resin, plywood, laminated veneer lumber.

Received: 05.08.2024

Accepted: 24.10.2025

Introducción

En la ingeniería, y específicamente en el ámbito de la construcción, se busca utilizar materias primas de alta calidad y costo accesible, que permitan realizar un trabajo eficiente. Sin embargo, los materiales comúnmente usados en este sector, como el acero y el hormigón armado, emiten un 34 % y un 81 % más de gases de efecto invernadero, respectivamente, en comparación con un diseño realizado en madera (Canadian Wood Council 2004). La madera es uno de los materiales más sustentables para construir, es un recurso renovable y más ecológico en comparación con materiales como el hormigón y el acero. En Chile, se han introducido variadas especies forestales entre las que se destacan los cultivos de *Eucalyptus* (eucalipto) y *Pinus radiata* D. Don (pino radiata), teniendo este

último una superficie acumulada de plantaciones forestales del 54,8 % en comparación a otras especies (Poblete-Hernández *et al.* 2023), por lo que esta especie es la que mayormente se utiliza para la fabricación de diferentes productos de ingeniería a base de madera y adhesivos, entre los que destacan los tableros contrachapados y la madera microlaminada.

Los tableros contrachapados están hechos de chapas de madera dispuestas perpendicularmente entre sí unidas con adhesivo. Generalmente, su uso está enfocado en pisos, paredes y construcciones de techos, paneles de protección contra el viento, cajas de transporte y cercos. Entre las ventajas de este tipo de tableros, está la facilidad de trabajo, resistencia a los golpes y apariencia natural, sin embargo, entre las desventajas se encuentran la baja durabilidad biológica, baja resistencia mecánica, baja resistencia al fuego y baja estabilidad dimensional (Demirkir *et al.* 2013). Por otro lado, la madera microlaminada (LVL) igualmente está hecha con chapas de madera, pero dispuestas paralelamente entre sí unidas con adhesivo. Su uso es mayormente estructural y entre las ventajas se encuentra, una buena estabilidad dimensional, propiedades mecánicas homogéneas y buena durabilidad frente a la madera maciza (Bal 2014, Núñez-Decap *et al.* 2022).

El problema de trabajar con la madera de pino radiata es que presenta bajas propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad frente a agentes externos. Por lo tanto, como solución a este problema, se propone el uso de fibras de ingeniería con altas prestaciones como refuerzo en la fabricación de los tableros contrachapados y maderas microlaminadas (LVL), con el objetivo de mejorar sus propiedades físicas y mecánicas, principalmente. Las fibras de ingeniería corresponden a materiales fibrosos con origen natural o artificial, con los que se fabrican hebras que luego se pueden encontrar en formato de hilo o más elaborados como tejidos, y se utilizan para reforzar otros materiales. Dentro de estas, están las fibras de carbono, que poseen excelentes propiedades mecánicas, termofísicas y una alta aplicación estructural, y las fibras de basalto, que representan una alternativa de menor costo, gran resistencia química y resistencia a altas temperaturas, aislamiento térmico y son de origen natural (Mahltig y Kyosev 2018). Además, según ha sido investigado (Saal *et al.* 2024), el refuerzo de fibras permite mejorar sustancialmente las propiedades mecánicas, por ejemplo, de los tableros

contrachapados, normalmente entre 10 % y 40 %, también, han sugerido que la adopción más amplia del contrachapado reforzado con fibras, contribuiría en gran medida a mejorar la durabilidad y longevidad del material, lo que permitiría un uso más sostenible de la materia prima maderera .

En los últimos años, se han realizado diversas investigaciones sobre el refuerzo de tableros u otros materiales con fibras de ingeniería. Destaca el estudio de Núñez-Decap *et al.* (2023), quienes evaluaron el comportamiento de maderas microlaminadas reforzadas con fibras de basalto y carbono, observando un mejor desempeño en las muestras reforzadas con resina epóxica y fibra de carbono. Se reportaron aumentos del 31 % en rigidez, 38 % en resistencia a la flexión, 56 % en resistencia a la tracción y 41 % en dureza Janka, respectivamente. Estos hallazgos indican que el refuerzo con fibras de ingeniería puede ser una estrategia efectiva para mejorar las propiedades mecánicas de tableros de madera. En esta dirección, trabajando con tableros contrachapados reforzados con fibras de basalto y de carbono, se ha reportado aumentos en el MOE y MOR en la dirección paralela de aproximadamente 48 % y 53 %, y en la dirección perpendicular aumentos de 52 % y 103 %, respectivamente. Además, de un incremento de al menos 37 % en la propiedad de dureza Janka, obteniéndose resultados superiores con el adhesivo de acetato de polivinilo (PVA). Estos hallazgos indican que el refuerzo con fibras de ingeniería puede ser una estrategia efectiva para mejorar las propiedades mecánicas de tableros contrachapados y madera microlaminada. (Núñez-Decap *et al.* 2022; Núñez-Decap *et al.* 2023)

Se han realizado también investigaciones enfocadas en evaluar distintos tipos de fibras de ingeniería, configuraciones estructurales y adhesivos para mejorar las propiedades físico-mecánicas de tableros contrachapados y maderas microlaminadas. En estudios sobre maderas microlaminadas (LVL) reforzadas con fibras de basalto y carbono, se observaron mejoras en rigidez a compresión, resistencia al cizallamiento y módulo elástico, especialmente con refuerzos unidireccionales (Rescalvo *et al.* 2022). Sin embargo, la calidad de la chapa, el tipo de adhesivo utilizado (como poliuretano), y la especie maderera (por ejemplo, álamo), limitaron la extrapolación de estos resultados a condiciones diferentes. Otros trabajos, han explorado el uso de fibras de basalto pretensadas en tableros

contrachapados, logrando incrementos del 35 % en resistencia a la tracción, aunque con limitaciones asociadas al formato de fibra y al uso de especies distintas como el abedul (Lohmus *et al.* 2021).

Por otro lado, también se ha explorado el uso de fibras de ingeniería en distintas ubicaciones, y diferentes formatos del tejido (unidireccional y bidireccional) en madera microlaminada y tableros contrachapados, logrando mejoras de 10 %, aproximadamente, en propiedades de flexión, además de mejoras en propiedades físicas como la absorción de agua e hinchamiento, utilizando diferentes formatos del tejido (Gallego *et al.* 2020; Auriga *et al.* 2020).

Además de las variaciones en especies madereras, y tipos y formatos de las fibras de ingeniería, se ha estudiado la combinación de estas con distintos tipos de adhesivos. Con el objetivo de utilizar adhesivos amigables con el medio ambiente, se ha logrado reemplazar la resina convencional (resina epoxi) con acetato de polivinilo (PVAc), obteniendo tableros contrachapados con alta ductilidad (Kramár *et al.* 2020).

Es importante destacar, que las investigaciones citadas, han sido desarrolladas exclusivamente a escala de laboratorio, y que además poseen otras limitantes como especie maderera (álamo, chopo), formato de refuerzo (trenzado, pretensado), sentido de la fibra (bidireccional, unidireccional), ubicaciones del reforzamiento, o adhesivos no amigables con el medio ambiente, entre otros. Esto restringe la posibilidad de extrapolar los resultados a contextos reales de aplicación. En este sentido, los estudios existentes deben considerarse como aproximaciones iniciales, útiles como referencia comparativa, pero insuficientes para validar desempeño estructural en condiciones reales.

La presente investigación intenta resolver un problema relacionado con el bajo rendimiento físico-mecánico de las chapas de madera de Pino radiata, lo que limita su uso en la industria de la construcción en comparación con materiales como el acero y el hormigón. Por ello, esta investigación busca mejorar el rendimiento físico-mecánico de tableros contrachapados y maderas microlaminadas fabricadas con Pino radiata, mediante la incorporación de combinaciones específicas de fibras de ingeniería de alto rendimiento (fibra de carbono y fibra de basalto) como refuerzo en formato tejido, junto a adhesivos epóxicos y PVAc. Combinaciones que no han sido abordadas hasta ahora según la

literatura revisada. Este vacío de conocimiento, es relevante abordarlo para abrir más oportunidades a la incorporación de la madera como material principal en la industria de la construcción.

Aunque el adhesivo PVAc no se considera tradicionalmente adecuado para aplicaciones estructurales, este estudio propone compararlo con la resina epóxica con el fin de evaluar su potencial como alternativa no tóxica para el refuerzo de tableros de madera, lo que aportaría una variante amigable con el medio ambiente en este estudio. En este contexto, se fabricarán, a escala de laboratorio tableros contrachapados y maderas microlaminadas (LVL), reforzados con fibras de carbono y de basalto, y con adhesivos PVAc y resina epóxica. El objetivo es comparar su comportamiento físico-mecánico, contribuyendo así a mejorar las prestaciones de productos de ingeniería a base de madera y adhesivos para aumentar el uso de la madera en la industria de la construcción.

Materiales y metodología

Materiales

Las chapas de madera de la especie pino radiata (*Pinus radiata* D. Don), las fibras de ingeniería de basalto (FB) y de carbono (FC) y los adhesivos fenol formaldehído (FF), acetato de polivinilo (PVAc D4) y resina epoxi bi-componente (RE), fueron provistos por el Laboratorio de Productos de Ingeniería a base de Madera y Adhesivos (PRODIMA-LAB), de la Universidad del Bío-Bío.

Las dimensiones de las chapas de madera son de 500 mm de largo x 500 mm de ancho x 2,2 mm a 3,6 mm de espesor, y de una densidad promedio de 456 kg/m³. Mientras que las propiedades de las fibras de ingeniería utilizadas, de acuerdo a las fichas técnicas respectivas como menciona (Núñez-Decap *et al.* 2022), se entregan en la Tabla 1.

Tabla 1: Propiedades de las fibras de refuerzo utilizadas para la fabricación de tableros contrachapados y maderas microlaminadas (Núñez-Decap *et al.* 2022).

Propiedades	Fibra de carbono	Fibra de basalto
Tejido	Bidireccional	Bidireccional
Espesor (mm)	0,28	0,18
Gramaje (g/m ²)	200	200
Esfuerzo tensional (MPa)	≥ 3500	≥ 1000

Las chapas de madera fueron unidas con adhesivo fenol formaldehído en las configuraciones correspondientes para la fabricación de los tableros contrachapados y maderas microlaminadas, mientras que las fibras de ingeniería fueron adheridas a los tableros con el adhesivo acetato de polivinilo y la resina epoxi. Las propiedades de los adhesivos utilizados para el reforzamiento de los tableros se especifican en la Tabla 2.

Tabla 2: Propiedades de los adhesivos utilizados para el reforzamiento de tableros contrachapados y maderas microlaminadas (Núñez-Decap *et al.* 2022).

Propiedades	Acetato de polivinilo	Resina epoxi	Endurecedor de resina epóxica
Viscosidad (mPa·s)	4500 - 5500	800 - 1500	30 - 70
pH	3,0 - 4,0	4,0 - 5,0	6,0 - 7,0
Contenido de sólidos (%)	45 - 48	100	

Metodología

Fabricación de tableros contrachapados y maderas microlaminadas reforzados

Los tableros contrachapados (PLY) se fabricaron a partir de 7 chapas de madera con adhesivo fenol formaldehído y con una lámina de fibra de ingeniería ubicada sobre la superficie del tablero flexo-traccionada, mientras que las maderas microlaminadas (LVL), se fabricaron a partir de 5 chapas de madera con adhesivo fenol formaldehído y con dos láminas de fibra de ingeniería, la primera sobre la superficie del tablero flexo-traccionada y la segunda entre la penúltima y última chapas del tablero (Figura 1). El propósito de que los tableros estén reforzados solo por una superficie es permitir al usuario decidir si dejar la fibra expuesta, por un tema estético. Por cada tipo de tablero, se fabricaron 4 muestras reforzadas; FB-PVAc, FB-RE, FC-PVAc, FC-RE y una muestra patrón no reforzada (P). El diseño de experimento se puede observar en la Tabla 3.

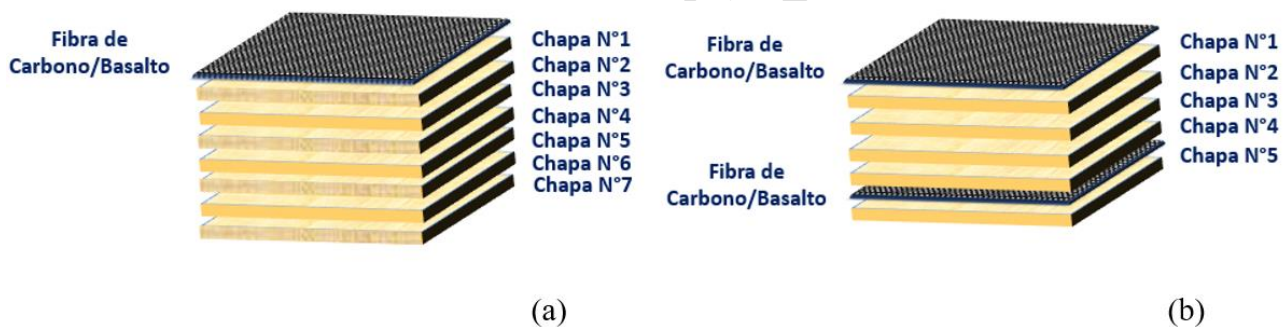


Figura 1: Ubicación del reforzamiento con fibra de carbono y basalto en (a) tableros contrachapados (PLY) y en (b) madera microlaminada (LVL).

Tabla 3: Diseño de experimento de tableros contrachapados y maderas microlaminadas (Núñez-Decap *et al.* 2022, Núñez-Decap *et al.* 2023).

ID	Cantidad de tableros fabricados		Cantidad de chapas de madera		Cantidad de láminas de fibra de ingeniería		Gramaje de adhesivo (g/m ²)	
	PLY	LVL	PLY	LVL	PLY	LVL	PLY	LVL
P	5	4	7	5	0	0	200	200
FB-PVAc	5	4	7	5	1	2	400	400
FB-RE	5	4	7	5	1	2	220	250
FC-PVAc	5	4	7	5	1	2	400	400
FC-RE	5	4	7	5	1	2	220	250

P: muestra patrón; FB-PVAc: muestra reforzada con fibra de basalto y adhesivo PVAc; FB-RE: muestra reforzada con fibra de basalto y resina epóxica; FC-PVAc: muestra reforzada con fibra de carbono y adhesivo PVAc; FC-RE: muestra reforzada con fibra de carbono y resina epóxica.

Para la fabricación de los tableros, en primer lugar se armaron las muestras según el diseño experimental y se prensaron en caliente a 120 °C (tableros y contrachapados) y 130 °C (maderas microlaminadas), en un ciclo de prensado de tres etapas según se muestra en la Figura 1a y Figura 1b, respectivamente. Luego del prensado en caliente, los tableros fueron sujetos inmediatamente a un prensado en frío a temperatura ambiente, bajo las mismas condiciones de tiempo y presión de la Figura 2.

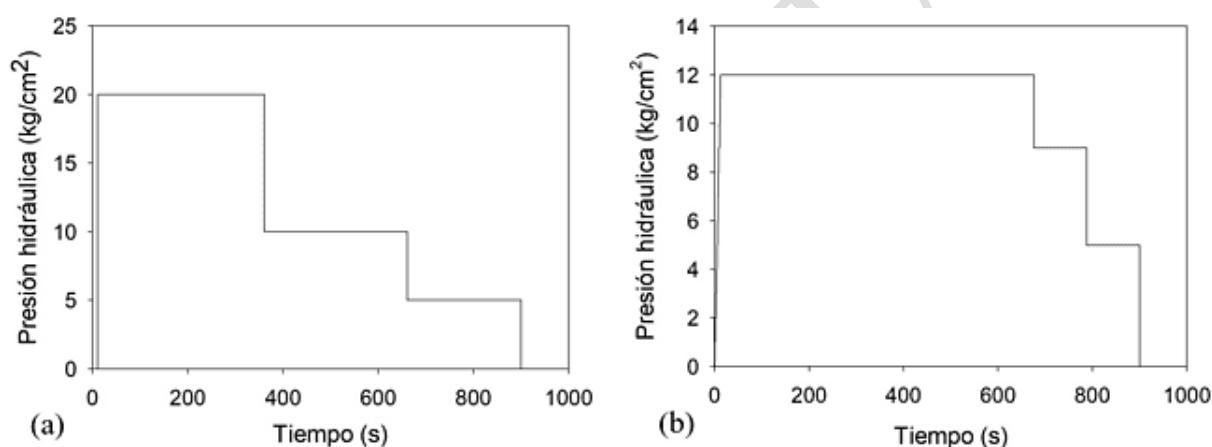


Figura 2: Ciclos de prensado (a) Tableros contrachapados; (b) Madera microlaminada (LVL).

En segundo lugar, al finalizar el proceso de prensado, los tableros fueron condicionados por 7 días a $23\text{ °C} \pm 3\text{ °C}$ y 65 % de humedad relativa. Luego, los tableros fueron formateados a 480 mm de largo x 480 mm de ancho. Finalmente, fueron cortados, según un diagrama de corte, en probetas según dimensiones mencionadas en las normativas correspondientes para la medición de calidad superficial, propiedades físicas y propiedades mecánicas. El proceso de fabricación de las muestras de tableros se puede observar en la Figura 3.



Figura 3: Proceso de fabricación de muestras de tableros contrachapados y maderas microlaminadas reforzados con fibras de ingeniería.

Calidad superficial

La calidad superficial de las muestras se determinó a través de la medición de la rugosidad superficial acorde a la normativa UNE-EN ISO 21920-3 (2023). El ensayo se realizó con un rugosímetro Mahr modelo MarSurf PS 10, y se midió la rugosidad longitudinal de cada muestra obteniendo las variables R_a (valor de rugosidad media) y R_z (valor máximo del perfil de rugosidad) medidas en μm (Figura 4). Sobre las muestras reforzadas, la rugosidad se midió en la cara con fibra de ingeniería.

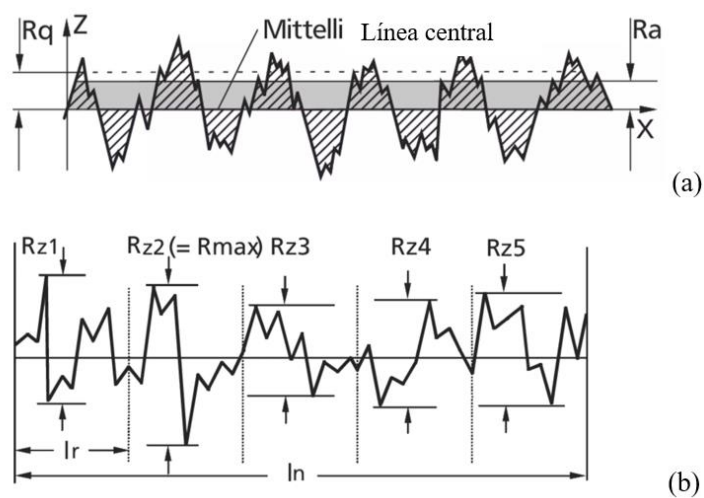


Figura 4: Variables de rugosidad (a) R_a ; (b) R_z . (Mahr 2017).

Propiedades físicas

Para medir las propiedades físicas de los tableros fabricados, se midieron las siguientes propiedades según normativas europeas: densidad (UNE-EN 323 1994), contenido de humedad (UNE-EN 322 1994) e hinchamiento a 24 horas bajo inmersión en agua (UNE-EN 317 1993) (Figura 5). Además, se midió el perfil de densidad de las probetas, en un densímetro Amersham plc AMCK6693 con rayos gamma.



Figura 5: Determinación de propiedades físicas de tableros contrachapados y maderas microlaminadas.

Propiedades mecánicas

En cuanto a las propiedades mecánicas de los tableros fabricados, se midieron las siguientes propiedades según normativas internacionales: flexión estática de tres puntos para PLY (UNE-EN 310 1994), flexión estática de cuatro puntos para LVL (UNE-EN 408 2012) (Figura 6b) y dureza

Janka (ASTM D1037 2020) (Figura 6c). Los ensayos de propiedades mecánicas fueron realizados en una máquina de ensayos universal Instron, modelo 100-23, equipada con el programa BlueHill2.

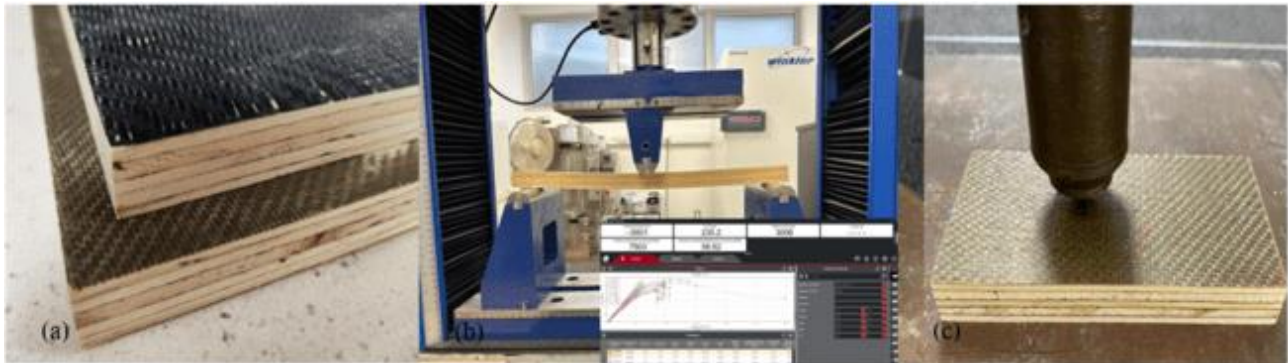


Figura 6: (a) Maderas microlaminadas (LVL) reforzadas con fibras de ingeniería; (b) Ensayo de flexión estática en tablero contrachapado; (c) Ensayo de dureza Janka sobre tablero contrachapado reforzado con fibra de basalto.

Análisis estadístico de datos

El análisis estadístico de los resultados obtenidos se realizó a través de una prueba LSD con un nivel de confianza del 95 %, utilizando el programa Statgraphics Centurion 19 (2024).

Resultados y discusion

Calidad superficial

Los resultados del ensayo de rugosidad superficial se muestran en la Tabla 4, donde se pueden observar dos claras diferencias: en primer lugar, los tableros reforzados con fibra de carbono, independientemente del adhesivo utilizado, demostraron una rugosidad superficial tanto promedio (Ra) como máxima (Rz), menor a las rugosidades obtenidas en los tableros reforzados con fibra de basalto. En segundo lugar, se puede observar que la muestra patrón obtuvo una rugosidad superficial mayor a las muestras reforzadas con fibra de carbono y menor a las muestras reforzadas con fibra de basalto.

Sin embargo, de los resultados obtenidos de Ra para la muestra patrón y las muestras reforzadas con fibra de carbono, se observa que se encuentra dentro del rango de rugosidad superficial en madera de pino (Valdez-Reinoso *et al.* 2019), mientras que las muestras reforzadas con fibra de basalto se encuentran sobre este rango. Cabe destacar, que según investigaciones en las que se busca incrementar la rugosidad de cada hebra de las fibras de ingeniería, un valor de rugosidad más alta mejoraría la adherencia entre las fibras y el sustrato que se busque reforzar (Balaji *et al.* 2020, Li *et al.* 2024, Wei *et al.* 2011). Por otro lado, entre las muestras reforzadas con cada fibra de ingeniería, no se presentan diferencias estadísticamente significativas, por lo que los adhesivos utilizados no influyeron estadísticamente en los resultados.

Tabla 4: Rugosidad superficial de las muestras de tableros reforzadas con fibras de ingeniería y adhesivos.

ID	Ra (μm)	Rz (μm)
P	4,00bc	22,35ab
FC-RE	2,45a	13,49a
FC-PVAc	3,39ab	16,81a
FB-RE	5,33cd	30,27b
FB-PVAc	6,33d	29,17b

Los promedios de las columnas están marcados con diferentes letras (a, b, c, y d) para indicar la diferencia estadística determinada por la prueba LSD con un nivel de confianza del 95 %; P: muestra patrón; FB-PVAc: muestra reforzada con fibra de basalto y adhesivo PVAc; FB-RE: muestra reforzada con fibra de basalto y resina epóxica; FC-PVAc: muestra reforzada con fibra de carbono y adhesivo PVAc; FC-RE: muestra reforzada con fibra de carbono y resina epóxica.

Propiedades físicas

Los resultados de las propiedades físicas medidas en muestras de tableros contrachapados y maderas microlaminadas reforzadas y no reforzadas, se encuentran en la Tabla 5.

Tabla 5: Propiedades físicas de los tableros contrachapados y maderas microlaminadas.

Tablero	Muestra	Densidad (kg/m ³)		Contenido de humedad (%)		Hinchamiento 24 horas (%)	
		Prom.	D.S.	Prom.	D.S.	Prom.	D.S.
Tablero contrachapado	P-PLY	436a	17,26	9ab	0,29	5,08c	1,01
	FB-PVAc-PLY	537bcd	11,23	10b	0,29	5,48c	1,04
	FB-RE-PLY	511b	9,74	9b	0,13	5,03c	0,98
	FC-PVAc-PLY	515b	11,53	9ab	0,14	5,02c	1,57
	FC-RE-PLY	554cde	30,27	11b	2,24	5,15c	0,89
Madera microlaminada	P-LVL	530bc	27,29	8a	0,64	1,26b	0,93
	FB-PVAc-LVL	568ef	41,92	12cd	0,40	0,00a	1,03
	FB-RE-LVL	570ef	31,81	11c	0,28	0,66ab	0,41
	FC-PVAc-LVL	585f	14,14	12d	0,14	0,60ab	0,64
	FC-RE-LVL	563def	43,13	10cd	0,82	0,74ab	0,45

Los promedios de las columnas están marcados con diferentes letras (a, b, c, d, e, y f) para indicar la diferencia estadística determinada por la prueba LSD con un nivel de confianza del 95 %; P: muestra patrón; FB-PVAc: muestra reforzada con fibra de basalto y adhesivo PVAc; FB-RE: muestra reforzada con fibra de basalto y resina epóxica; FC-PVAc: muestra reforzada con fibra de carbono y adhesivo PVAc; FC-RE: muestra reforzada con fibra de carbono y resina epóxica; D.S.: desviación estándar.

Los resultados de densidad obtenidos en las muestras de tableros contrachapados, se encontraron dentro del rango entre 436 kg/m³ y 554 kg/m³, mientras que las muestras de maderas microlaminadas se encontraron entre 530 kg/m³ y 585 kg/m³. Las densidades a lo largo del espesor del tablero se pueden observar en los perfiles de densidad (Figura 7), en los que se pueden observar peaks de valores de densidades más altos, que corresponden a las densidades de los reforzamientos de fibras de ingeniería y el adhesivo que une cada chapa, en comparación a la densidad de las chapas de madera. Los peaks más altos están donde se ubican los refuerzos, por lo que en las densidades de la Tabla 5

hay valores de densidad mayores en las muestras de tableros reforzados en comparación a las muestras patrón.

Los contenidos de humedad de las muestras de ambos tipos de tableros se encontraron dentro del rango entre 8 % y 12 %, lo que se considera dentro del rango normal o esperado.

De los resultados de hinchamiento a 24 horas se puede observar que los rangos de esta propiedad en las muestras de tableros contrachapados estuvieron entre 5,02 % y 5,48 %, mientras que en las muestras de maderas microlaminadas estuvieron entre 0 % y 1,26 %. En los tableros contrachapados, no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre las muestras de tableros reforzados y la muestra patrón, mientras que en las maderas microlaminadas, se observó una mejora en la estabilidad dimensional en las todas las muestras reforzadas en comparación a la muestra patrón, lo que puede estar asociado a las propiedades hidrofóbicas de la matriz reforzante, como lo señala (Raj *et al.* 2017).

Por otro lado, se observa una diferencia estadísticamente significativa de esta propiedad entre ambos tipos de tableros, teniendo las maderas microlaminadas valores de hinchamiento considerablemente menores, ya que este tipo de tableros está diseñado como un producto de madera con una alta capacidad de estabilidad dimensional, lo que se relaciona con la orientación de las chapas que al estar en concordancia con la orientación de la fibra de la madera, logran alcanzar los niveles máximos de resistencia requeridos del producto (Jucienė *et al.* 2023, Tenorio *et al.* 2011).

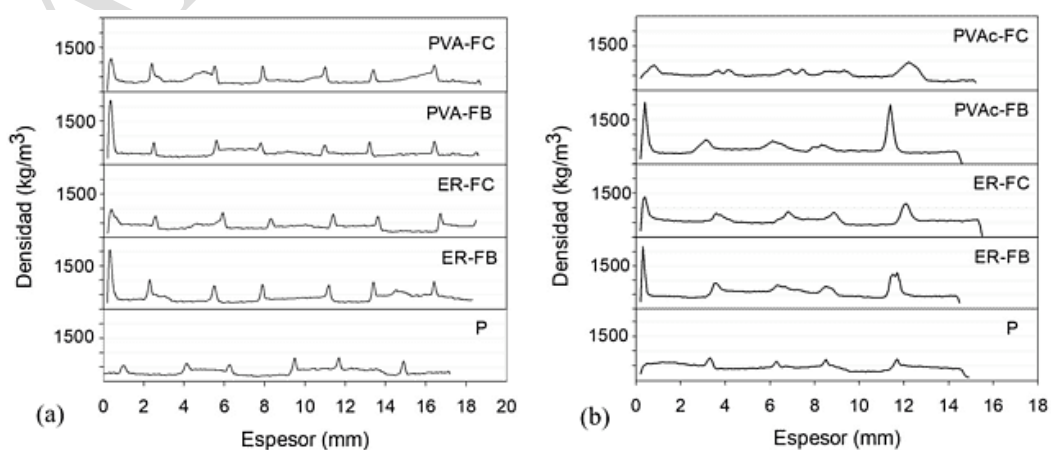


Figura 6: Perfiles de densidad por cada muestra en (a) Tableros contrachapados; (b) Madera microlaminada.

Propiedades mecánicas

Los resultados de las propiedades mecánicas de flexión estática y dureza Janka en muestras de tableros contrachapados y maderas microlaminadas reforzados y no reforzados, se encuentran en la Tabla 6, Figura 8 y Figura 9.

Tabla 6: Propiedades mecánicas de los tableros contrachapados y maderas microlaminadas.

Tablero	Muestra	Dirección fibra	Flexión estática				Dureza Janka (N)	
			MOE (MPa)		MOR (MPa)		Prom.	D.S.
			Prom.	D.S.	Prom.	D.S.		
Tablero contrachapado	P-PLY	Paralela	3372ab	422	34,65 ^a	4,68	1866a	181
		Perpendicular	2675 ^a	190	25,08a	1,48		
	FB-PVAc-PLY	Paralela	4192ab	724	44,65ab	5,63	2968bcd	406
		Perpendicular	3188ab	529	43,81b	3,75		
	FB-RE-PLY	Paralela	3680 ^a	351	47,40ab	2,97	2621bc	317
		Perpendicular	3453bc	531	39,52b	5,95		
	FC-PVAc-PLY	Paralela	4739b	948	51,47b	10,15	3354d	380
		Perpendicular	3900bc	322	50,89c	2,24		
	FC-RE-PLY	Paralela	4998ab	381	52,95b	4,49	2567b	219
		Perpendicular	4066c	305	42,89b	7,68		
Madera microlaminada	P-LVL	Cara	6274c	2001	62,69c	14,31	2960bcd	522
		Canto	8442d	1353	59,14de	8,56		
	FB-PVAc-LVL	Cara	6857c	626	63,09c	5,63	2886bcd	537
		Canto	8386d	1065	58,71d	8,29		
	FB-RE-LVL	Cara	6248c	2033	64,20c	13,47	3091cd	466
		Canto	11476f	984	76,08g	4,87		
	FC-PVAc-LVL	Cara	7303cd	967	69,89c	7,43	3892e	747
		Canto	9754e	979	64,38ef	8,59		
	FC-RE-LVL	Cara	8190d	2740	86,27d	18,31	4186e	664
		Canto	9626e	672	64,72f	9,40		

Los promedios de las columnas están marcados con diferentes letras (a, b, c, d, e, f, y g) para indicar la diferencia estadística determinada por la prueba LSD con un nivel de confianza del 95 %; P: muestra patrón; FB-PVAc: muestra reforzada con fibra de basalto y adhesivo PVAc; FB-RE: muestra reforzada con fibra de basalto y resina epóxica; FC-PVAc: muestra reforzada con fibra de carbono y adhesivo PVAc; FC-RE: muestra reforzada con fibra de carbono y resina epóxica; D.S.: desviación estándar.

Sobre las propiedades de flexión en tableros contrachapados, los resultados de módulo de elasticidad (MOE) y módulo de rotura (MOR) se encuentran en un rango entre 3372 MPa y 4998 MPa, y entre 34,65 MPa y 52,95 MPa, respectivamente. Para la dirección paralela de la fibra, y en un rango entre 2675 MPa y 4066 MPa, y entre 25,08 MPa y 50,89 MPa, respectivamente, para la dirección perpendicular de la fibra.

En cuanto a la rigidez en tableros contrachapados, se observó que todas las muestras reforzadas presentaron el mismo valor estadísticamente que la muestra patrón en el sentido paralelo, mientras que en el sentido perpendicular las muestras FB-RE, FC-PVAc y FC-RE presentaron un aumento de 29 %, 46 % y 52 % del MOE de la muestra patrón, respectivamente.

En cuanto a la resistencia a la flexión en tableros contrachapados, se observó que las muestras FC-PVAc y FC-RE presentaron un aumento de 49 % y 53 % del MOR de la muestra patrón en el sentido paralelo, respectivamente, mientras que en sentido perpendicular todas las muestras reforzadas presentaron valores más altos que la muestra patrón, presentando aumentos entre 58 % y 103 %.

Sobre las propiedades de flexión en madera microlaminada, los resultados de MOE y de MOR se encuentran en un rango entre 6248 MPa y 8190 MPa, respectivamente, en la cara del tablero y en un rango entre 8386 MPa y 11476 MPa, respectivo, en el canto del tablero.

En cuanto a la rigidez en maderas microlaminadas, se observó que en la cara hubo un aumento de 30 % de la muestra FC-RE y el resto de las muestras reforzadas presentaron el mismo valor estadísticamente que la muestra patrón, mientras que en el canto hubo un aumento de 36 %, 16 % y 14 % de las muestras FB-RE, FC-PVAc y FC-RE, respectivamente, en comparación a la muestra patrón. Y la muestra FB-PVAc presentó el mismo valor estadísticamente que la muestra patrón.

En cuanto a la resistencia a la flexión en maderas microlaminadas, se observó que en la cara hubo un aumento de 38 % de la muestra FC-RE y el resto de las muestras reforzadas presentaron el mismo valor estadísticamente que la muestra patrón, mientras que en el canto hubo un aumento de 29 % y 9 % de las muestras FB-RE y FC-RE, respectivamente, en comparación a la muestra patrón. Y las

muestras reforzadas con adhesivo PVAc presentaron el mismo valor estadísticamente que la muestra patrón.

Los resultados de las propiedades de flexión obtenidos se ven validados por las investigaciones de los autores Núñez-Decap *et al.* (2023), Núñez-Decap *et al.* (2022), Auriga *et al.* (2020), Wang *et al.* (2015), y Rescalvo *et al.* (2022), trabajos que también concluyen que el reforzamiento con fibras de ingeniería sobre tableros de madera, ayuda a mejorar las propiedades mecánicas, en este caso de rigidez y resistencia a la flexión, en comparación a tableros de madera sin reforzamiento.

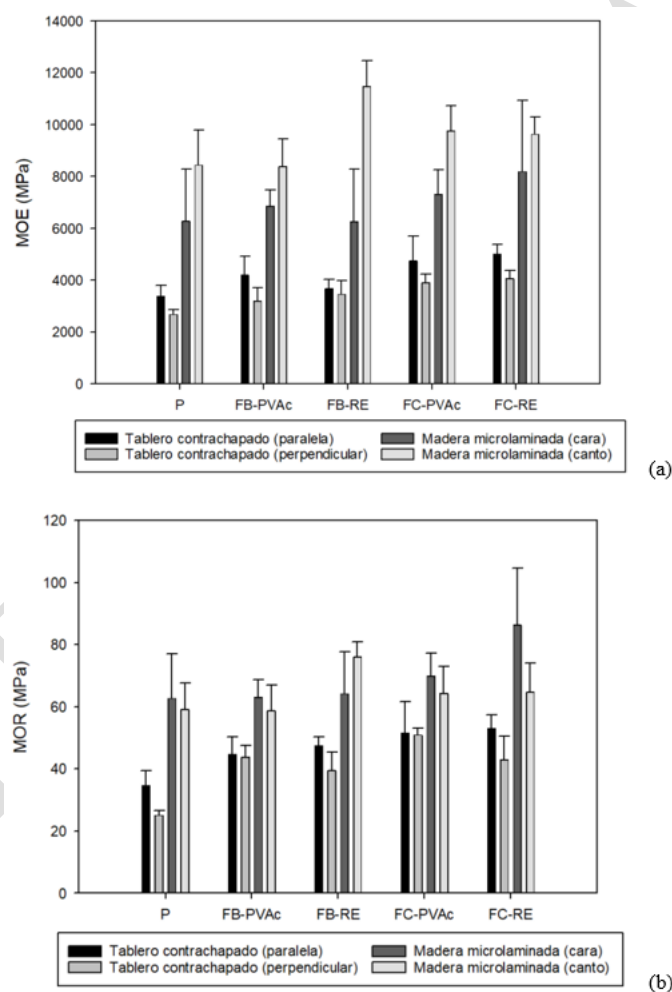


Figura 8: Resultados del ensayo a flexión: (a) rigidez en flexión (MOE) y (b) resistencia a la flexión (MOR) de las muestras de tableros contrachapados en dirección paralela y perpendicular, y de las muestras de maderas microlaminadas en dirección cara y canto.

Los resultados de dureza Janka en tableros contrachapados, se encuentran en un rango entre 1866 N y 3354 N, mientras que en maderas microlaminadas, se encuentran en un rango entre 2886 N y 4186 N. En cuanto a la máxima fuerza que resistieron los tableros contrachapados a la dureza Janka, se

observó un aumento en todas las muestras reforzadas de entre 38 % y 80 %. Mientras que en las maderas microlaminadas, se observó un aumento de 31 % y 41 % en las muestras FC-PVAc y FC-RE, respectivamente. Los valores obtenidos de la carga máxima del ensayo de dureza Janka tienen concordancia con lo mencionado en la investigación de Núñez-Decap *et al.* (2022), en donde todas las muestras reforzadas ensayadas, soportaron una carga máxima más alta que la muestra patrón no reforzada.

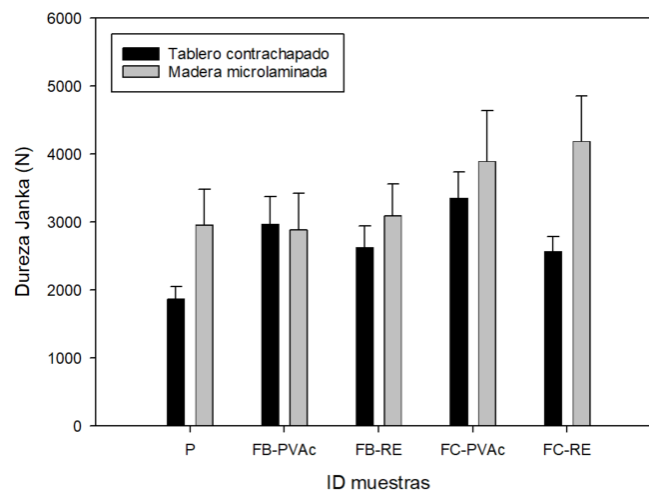


Figura 9: Resultados del ensayo de dureza Janka sobre muestras de tableros contrachapados y maderas microlaminadas.

En general, se observó que los tableros reforzados presentaron prestaciones mecánicas más altas que los tableros no reforzados, lo que involucra las fibras y adhesivos utilizados. En el caso de las fibras, en general, se observó un mejor comportamiento al utilizar fibra de carbono en comparación a la fibra de basalto, lo que fue esperado ya que, las fibras de carbono, en comparación con otras fibras, ocupa una posición pionera en aplicaciones estructurales debido a su estructura de fibra superior, combinada con propiedades físicas y mecánicas, sin embargo su principal limitación es su elevado costo (Das *et al.* 2019, Li *et al.* 2017). Por otro lado, al comparar los adhesivos utilizados para adherir las fibras de ingeniería, se observó, en general, un mejor comportamiento al utilizar resina epóxica que polivinil acetato, lo que tiene sentido, porque el acetato de polivinilo es un adhesivo termoplástico no estructural de fácil manejo, amigable con el medio ambiente y más económico que la resina epoxi,

adhesivo estructural termoestable, con alta resistencia a la corrosión y productos químicos, excelentes características térmicas y mecánicas (Kramár *et al.* 2020, Rafique *et al.* 2016).

Los casos en que el reforzamiento de fibra de basalto y/o con adhesivo PVAc, presentaron un mejor comportamiento, son los que se buscan destacar en esta investigación, ya que se estaría considerando un sistema más económico y más amigable con el medio ambiente, que al utilizar fibra de carbono y resina epoxi.

Conclusiones

El estudio permitió demostrar que el refuerzo con fibras de ingeniería mejora significativamente el comportamiento físico-mecánico de los tableros contrachapados y maderas microlaminadas fabricados con Pino radiata.. En términos generales, se comprobó que los tableros reforzados superaron a los no reforzados y que en , ciertos casos las fibras de basalto ofrecieron un desempeño comparable o incluso superior al de las fibras de carbono, sugiriendo que la selección del refuerzo puede adaptarse al tipo de aplicación esperada. En particular, las fibras de carbono redujeron la rugosidad superficial en mayor medida, mientras que la de basalto aumentaron esta propiedad, lo que puede ser relevante según requiemientos de acabado superficial. En los tableros contrachapados, las muestras reforzadas mantuvieron la rigidez (MOE) en flexión en dirección paralela y aumentaron hasta un 52 % en la perpendicular. La resistencia a la flexión (MOR) aumentó hasta un 53 % en la dirección paralela y hasta un 103 % en la perpendicular. Por otro lado, la dureza Janka fue hasta un 80 % mayor que en la muestra patrón sin reforzamiento.

En las maderas microlaminadas, las muestras reforzadas redujeron el hinchamiento hasta un 100 %.

La rigidez y resistencia a la flexión aumentaron hasta un 30 % y 38 % en la cara y hasta un 36 % y

29 % en el canto, respectivamente. Por otro lado, la dureza Janka, fue hasta un 41 % mayor en muestras reforzadas.

Por lo tanto, se concluye que las muestras reforzadas con fibra de ingeniería presentan igual o mejor desempeño en hinchamiento y propiedades mecánicas que las no reforzadas en tableros contrachapados y en maderas microlaminadas. Lo que demuestra un aporte a la industria de la construcción, ya que se podría utilizar la madera como material principal para esta industria, con mejores estaciones físico-mecánicas, que potencialmente podrían ser un reemplazo a los materiales tradicionales, además de ser un aporte mediambiental al país. Los resultados obtenidos cumplen el objetivo de esta investigación y se espera, en una siguiente etapa, escalar y validar el proceso a nivel industrial.

Declaración de autorías

M. N-D.: Conceptualización, curación de datos, análisis formal, adquisición de financiación, investigación, metodología, administración de proyectos, recursos, software, supervisión, validación, visualización, redacción de borrador original, escritura, discusión y edición. M. V-V.: Investigación, metodología, software, redacción de borrador original, escritura, discusión y edición. B. M-R.: Investigación, metodología, software, redacción de borrador original, escritura, discusión y edición. C. O-C.: Investigación, metodología, software, redacción de borrador original, escritura, discusión y edición. G. R-E.: Investigación, metodología.

Agradecimientos

Se agradece la colaboración, equipamiento e infraestructura provistos por el Laboratorio de Productos de Ingeniería a base de Madera y Adhesivos (PRODIMA-LAB), del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad del Bío-Bío. Además, agradecemos al proyecto ANID BASAL FB210015.

Referencias:

- American Society for Testing and Materials. ASTM. 2020.** Standard test methods for evaluating properties of wood-base fiber and particle panel materials. ASTM D1037-12R20. ASTM International: West Conshohocken, USA. <https://www.astm.org/d1037-12r20.html>
- Asociación Española de Normalización. AENOR. 1993.** Determinación de la hinchazón en espesor después de inmersión en agua. UNE-EN 317. AENOR: Madrid, España.
- Asociación Española de Normalización. AENOR. 1994.** Determinación del módulo de elasticidad en flexión y de la resistencia a la flexión. UNE-EN 310. AENOR: Madrid, España.
- Asociación Española de Normalización. AENOR. 1994.** Tableros derivados de la madera. Determinación del contenido de humedad. UNE-EN 322. AENOR: Madrid, España.
- Asociación Española de Normalización. AENOR. 1994.** Tableros derivados de la madera. Determinación de la densidad. UNE-EN 323. AENOR: Madrid, España.
- Asociación Española de Normalización. AENOR. 2012.** Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas. UNE-EN 408. AENOR: Madrid, España.
- Asociación Española de Normalización. AENOR. 2023.** Especificación geométrica de productos (GPS). Calidad superficial: Método del perfil. Parte 3: Operadores de especificación. UNE-EN ISO 21920. AENOR: Madrid, España.
- Auriga, R.; Gumowska, A.; Szymanowski, K.; Wronka, A.; Robles, E.; Ocipka, P.; Kowaluk, G. 2020.** Performance properties of plywood composites reinforced with carbon fibers. *Composite Structures* 248. e112533. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112533>
- Bal, B.C. 2014.** Some physical and mechanical properties of reinforced laminated veneer lumber. *Construction and Building Materials* 68:120-126. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.042>.
- Balaji, K.V.; Shirvanimoghaddam, K.; Rajan, G.S.; Ellis, A.V.; Naebe, M. 2020.** Surface treatment of Basalt fiber for use in automotive composites. *Materials Today Chemistry* 17: e100334. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2020.100334>
- Canadian Wood Council. 2004.** Energy and the environment in residential construction. Sustainable Building. Canadian Wood Council: Ontario, Canada. <https://cwc.ca/wp-content/uploads/publications-Energy-and-the-Environment.pdf>
- Das, T.; Ghosh, P.; Das, N. 2019.** Preparation, development, outcomes, and application versatility of carbon fiber-based polymer composites: A review. *Adv. Compos. Hybrid Mater* 2: 214–233. <https://doi.org/10.1007/s42114-018-0072-z>
- Demirkir, C.; Özsahin, Ş.; Aydin, I.; Colakoglu, G. 2013.** Optimization of some panel manufacturing parameters for the best bonding strength of plywood. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 46: 14-20. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2013.05.007>
- Gallego, A.; Rescalvo, F.; Suarez, E. 2020.** Madera microlaminada estructural de chopo reforzada con tejidos de carbono o basalto. MSc Thesis. Universidad de Granada: Granada, España. <http://hdl.handle.net/20.500.12251/1682>
- Jucienė, M.; Dobilaitė, V.; Albrektas, D. 2023.** An investigation of the impact of water on certain of the mechanical and physical properties of laminated veneer lumber (LVL) as used in construction. *Applied Sciences* 13(2). e925. <https://doi.org/10.3390/app13020925>
- Kramár, S.; Trecala, M.; Chitbanyong, K.; Král, P.; Puangsin, B. 2020.** Basalt-fiber-reinforced polyvinyl acetate resin: a coating for ductile plywood panels. *Materials* 13(1). e49. <https://doi.org/10.3390/ma13010049>
- Li, G.-Z.; Zhang, S.; Yu, H.; Liu, G.; Wang, W.; Chen, G.; Wang, J.; Wan, W.; Lu, Q.; Chen, H.; Han, R. 2024.** Enhancing the mechanical properties of basalt fiber/nylon 6 composites by surface roughening and hydrogen bonding interaction. *Polymer Composites* 45(9): 7801-7810. <https://doi.org/10.1002/pc.28304>
- Li, Q.; Xie, S.; Serem, W.; Naik, M.; Liu, L.; Yuan, J. 2017.** Quality Carbon Fiber from Fractionated Lignin. *Green Chem* 19: 1628–1634. <https://doi.org/10.1039/C6GC03555H>

Lohmus, R.; Kallakas, H.; Tuhkanen, E.; Gulik, V.; Kiisk, M.; Saal, K.; Kalamees, T. 2021. The effect of prestressing and temperature on tensile strength of basalt fiber-reinforced plywood. *Materials* 14(16). e4701. <https://doi.org/10.3390/ma14164701>

Mahlting, B.; Kyosev, Y. 2018. *Inorganic and composite fibers: production, properties, and applications*. The Textile Institute Book Series. Elsevier: United Kingdom. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102228-3.09999-0>

Mahr - Equipo de Marketing. 2017. Medición de superficies. Selección del filtro adecuado. <https://www.mahr.com/es/noticias-y-eventos/vista-del-articulo/medicion-de-superficies-seleccion-del-filtro-adecuado>

Núñez-Decap, M.; Barra-Rodríguez, Y.; Opazo-Carlsson, C.; Moya-Rojas, B.; Vidal-Vega, M.; Opazo-Vega, A. 2022. Use of carbon and basalt fibers with adhesives to improve physical and mechanical properties of plywood. *Applied Sciences* 12(10). e5114. <https://doi.org/10.3390/app12105114>

Núñez-Decap, M.; Sandoval-Valderrama, B.; Opazo-Carlsson, C.; Moya-Rojas, B.; Vidal-Vega, M.; Opazo-Vega, A. 2023. Use of carbon and basalt fibers with adhesives to improve physical and mechanical properties of laminated veneer lumber. *Applied Sciences* 13(18). e10032. <https://doi.org/10.3390/app131810032>

Poblete-Hernández, P.; Gysling-Caselli, J.; Álvarez-González, V.; Bañados-Munita, J.C.; Kahler-González, C.; Pardo-Velásquez, E.; Soto-Aguirre, D.; Baeza-Rocha, D. 2023. *Anuario Forestal 2023*. Instituto Forestal (INFOR): Santiago, Chile. <https://doi.org/10.52904/20.500.12220/32652>

Rafique, I.; Kausar, A.; Muhammad, B. 2016. Epoxy resin composite reinforced with carbon fiber and inorganic filler: overview on preparation and properties. *Polymer-Plastics Technology and Materials* 55(15): 1653-1672. <https://doi.org/10.1080/03602559.2016.1163597>

Raj, S.; Kumar, V.R.; Kumar, B.H.B.; Iyer, N.R. 2017. Basalt: structural insight as a construction material. *Sadhana* 42(1): 75-84. <https://doi.org/10.1007/s12046-016-0573-9>

Rescalvo, F.J.; Duriot, R.; Pot, G.; Gallego, A. 2022. Mechanical behaviour of poplar laminated veneer lumber with fiber reinforced polymer under shear and compression stresses. *Wood Material Science & Engineering* 18(3): 893-901. <https://doi.org/10.1080/17480272.2022.2086819>

Statgraphics Technologies, Inc. 2024. Statgraphics Centurion v.19.6.04. Statgraphics Technologies, Inc.: The Plains, Virginia, USA. <https://www.statgraphics.com/>

Saal, K.; Kallakas, H.; Tuhkanen, E.; Just, A.; Rohumaa, A.; Kers, J.; Kalamees, T.; Lohmus, R. 2024. Fiber-reinforced plywood: increased performance with less raw material. *Materials* 17(13). e3218. <https://doi.org/10.3390/ma17133218>

Tenorio, C.; Moya, R.; Muñoz-Acosta, F. 2011. Comparative study on physical and mechanical properties of laminated veneer lumber and plywood panels made of wood from fast-growing *Gmelina arborea* trees. *Journal of Wood Science* 57(2): 134-139. <https://doi.org/10.1007/s10086-010-1149-7>

Valdez-Reinoso, R.H.; Fernández-Concepción, R.R.; León-Sánchez, M.A.; Cecilia-Simón, N.; Álvarez-Lazo, D.A. 2019. Análisis de la rugosidad superficial de diferentes maderas en las provincias de Pinar del Río y Artemisa, Cuba. *Revista Cubana de Ciencias Forestales* 7(1): 1-16. <https://cfores.upr.edu.cu/index.php/cfores/article/view/386>

Wang, J.; Guo, X.; Zhong, W.; Wang, H.; Cao, P. 2015. Evaluation of mechanical properties of reinforced poplar laminated veneer lumber. *BioResources* 10(4): 7455-7465. <https://doi.org/10.15376/biores.10.4.7455-7465>

Wei, B.; Cao, H.; Song, S. 2011. Surface modification and characterization of basalt fibers with hybrid sizings. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 42(1): 22-29. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.09.010>