

Resistencia al esfuerzo cortante de madera sólida, laminada, densificada y reforzada con fibra de carbono

Shear strength of solid, laminated, densified, and carbon fiber reinforced wood

Javier Ramón Sotomayor Castellanos^{1*}, Koji Adachi², Firas Hawasly²

¹ Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México. CP. 58030. Tel. 443 322 3500; javier.sotomayor@umich.mx

² Instituto de Tecnología de la Madera, Universidad Prefectoral de Akita, Noshiro, Akita, Japón. Tel. 0185 52 6900; kadachi@iwt.akita-pu.ac.jp; hawasly_firas@iwt.akita-pu.ac.jp

*Autor de correspondencia

Resumen

Palabras clave:

Cryptomeria japonica; propiedades mecánicas; rigidez elástica.

Modificando su estructura original, las características mecánicas de la madera pueden mejorarse. El objetivo de la investigación fue evaluar la resistencia al esfuerzo cortante de la madera sólida, laminada, densificada y reforzada con fibra de carbono. Para comparar los resultados de la madera modificada con los de la madera sólida, se prepararon seis configuraciones de probetas de *Cryptomeria japonica* y se determinó su resistencia al corte y su retención. En comparación con la madera sólida sin tratamiento, la resistencia al esfuerzo cortante de la madera densificada aumenta 11%, la laminada 19% y la reforzada 1%. Por otro lado, el esfuerzo cortante de la madera laminada y densificada disminuye 16% y el de la madera densificada laminada y reforzada disminuye 23%. Además, la rigidez elástica aparente de la madera laminada, densificada y laminada reforzada se incrementa en relación con la de la madera sólida.

Abstract

Keywords:

Cryptomeria japonica; mechanical properties; elastic stiffness.

By modifying its original structure, the mechanical properties of wood can be improved. The objective of the research was to evaluate the shear strength of solid, laminated, densified wood, and wood reinforced with carbon fiber. To compare the results of modified wood with those of solid wood, six configurations of samples of *Cryptomeria japonica* were prepared, and their shear strength and retention were determined. Compared to untreated solid wood, the shear strength of densified wood increases by 11%, laminated wood by 19%, and reinforced wood by 1%. On the other hand, the shear strength of laminated and densified wood decreases by 16%, while that of densified laminated and reinforced wood decreases by 23%. Moreover, the apparent elastic stiffness of glulam, densified, and reinforced laminated timber increases relative to that of solid wood.

Recibido: 10 de mayo de 2024

Aceptado: 28 de marzo de 2025

Publicado: 10 de septiembre de 2025

Cómo citar: Sotomayor, J. R., Adachi, K., & Hawasly, F. (2025). Resistencia al esfuerzo cortante de madera sólida, laminada, densificada y reforzada con fibra de carbono. *Acta Universitaria* 35, e4382. doi: <https://doi.org/10.15174/au.2025.4382>

Introducción

Las características mecánicas de la madera sólida pueden ser mejoradas transformando su estructura material mediante procesos de densificado (Gondaliya *et al.*, 2023), de laminado (Gašparík *et al.*, 2017) y de reforzado (Kawecki & Sumorek, 2022). Así, la madera puede ser modificada en productos estandarizados para la industria de la construcción y del mueble (Irle, 2019; Svoboda *et al.*, 2019).

Cuando se caracterizan vigas de madera laminadas con dimensiones de servicio, la resistencia al esfuerzo cortante se determina aplicando normas experimentales (Steiger *et al.*, 2010). Desde otra perspectiva, se desarrollan configuraciones con probetas de pequeñas dimensiones para medir la eficiencia del adhesivo en diferentes especies de madera reconstituida (Aristri *et al.*, 2021; Bernaczyk *et al.*, 2023; Shirmohammadi & Leggate, 2022).

Los principales factores que intervienen en la calidad de las uniones de madera que emplean adhesivos son: la especie y sus propiedades mecánicas, las dimensiones de las piezas, las propiedades del adhesivo, la preparación de las superficies de contacto y las condiciones de prensado (Hänsel *et al.*, 2022). De tal forma que los datos accesibles en la literatura sobre las características mecánicas de la madera laminada son difícilmente comparables (Feujofack & Loss, 2023; Schubert *et al.*, 2023).

El objetivo de la investigación fue determinar la resistencia al esfuerzo cortante de la madera sólida, laminada, densificada y reforzada con fibra de carbono. Para lograr esto, se realizaron pruebas de resistencia al esfuerzo cortante en probetas de pequeñas dimensiones de *Cryptomeria japonica* y se comparó la retención de resistencia de las probetas modificadas con la de la madera sólida.

Materiales y métodos

El procedimiento de preparación del material experimental se adecuó del protocolo documentado por Sotomayor-Castellanos *et al.* (2024). La madera de *Cryptomeria japonica* fue adquirida en la Prefectura de Akita, Japón. La determinación del taxón botánico de la especie se realizó en el Instituto de Tecnología de la Madera, perteneciente a la Universidad Prefectoral de Akita, en Japón. La madera se cortó en láminas de diferentes grosores: 10 mm, 20 mm y 40 mm, todas con un ancho de 150 mm y largo de 410 mm. Se hicieron seis tipos de placas de las que se cortaron las probetas.

Con el objetivo de densificar la madera, las láminas fueron colocadas en una prensa Tensilon modelo TS-100 (Shon ai-Tekko, Japón), con una capacidad de carga de 100 ton. Las láminas se comprimieron en dirección radial a una velocidad de prensado de 0.001 m min^{-1} hasta alcanzar un espesor del 50% de su dimensión original. La presión aplicada se situó en el rango de 30 MN m^{-2} a 50 MN m^{-2} . Después de alcanzar el coeficiente de densificación del 50% (Sotomayor-Castellanos, 2017), las placas fueron mantenidas en la prensa a una temperatura de 120°C durante seis horas con el fin de consolidar la deformación. Posteriormente, las láminas fueron enfriadas durante 12 horas a una temperatura de 20°C con el fin de fijar el objetivo de densificado en 50% (Figura 1).

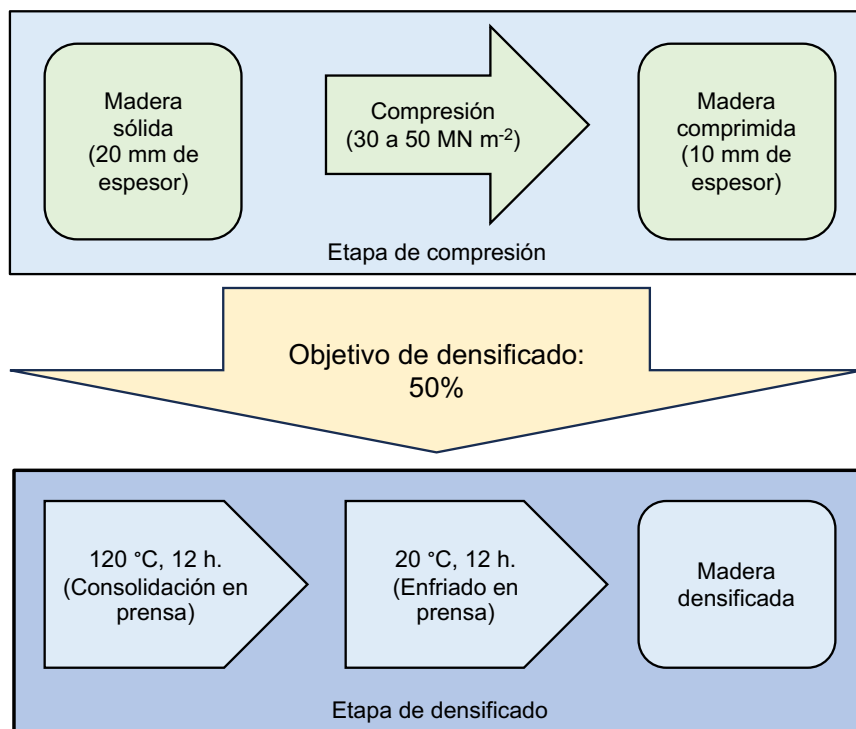


Figura 1. Etapas del proceso de densificado.

Fuente: Elaboración propia.

Después de preparar las placas, se crearon piezas de 20 mm de ancho, 20 mm de grosor y 360 mm de largo (ISO 3129:2012) (International Organization for Standardization [ISO], 2012). Estas probetas se mantuvieron a una temperatura de 20 °C y una humedad del aire del 65% hasta que alcanzaron un nivel de humedad del 11%. Las probetas fueron confeccionadas con madera de albura y se examinaron para asegurar que no presentaban anomalías de crecimiento y madera de duramen. Se elaboraron seis muestras para cada configuración. La dirección radial y tangencial se determinan en relación con los anillos de crecimiento en el plano radial-tangencial del plano leñoso, tal como se ilustra en la Figura 2.

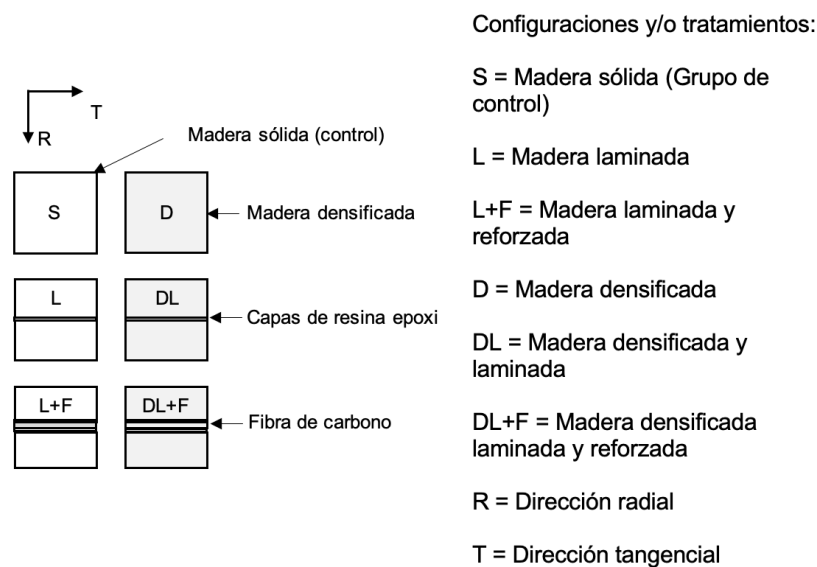


Figura 2. Configuraciones de las probetas y/o tratamientos.
Fuente: Elaboración propia.

Para fabricar las probetas laminadas, se adhirieron dos láminas de madera con dos capas de resina epoxi E200 (Konishi, Japón) de 22 gramos cada una (200 g m^{-2}) (Guo *et al.*, 2022). La presión de compresión fue de 10 kg m^{-2} , a una temperatura de 20°C y durante 12 h de curado. Con el objetivo de reforzar las probetas laminadas, se añadió una capa de tejido de fibra de carbono (15 g; Nippon Oil Corporation, Japón) en el plano longitudinal-tangencial. La Figura 3 ilustra las dimensiones y la configuración de las probetas para las pruebas.

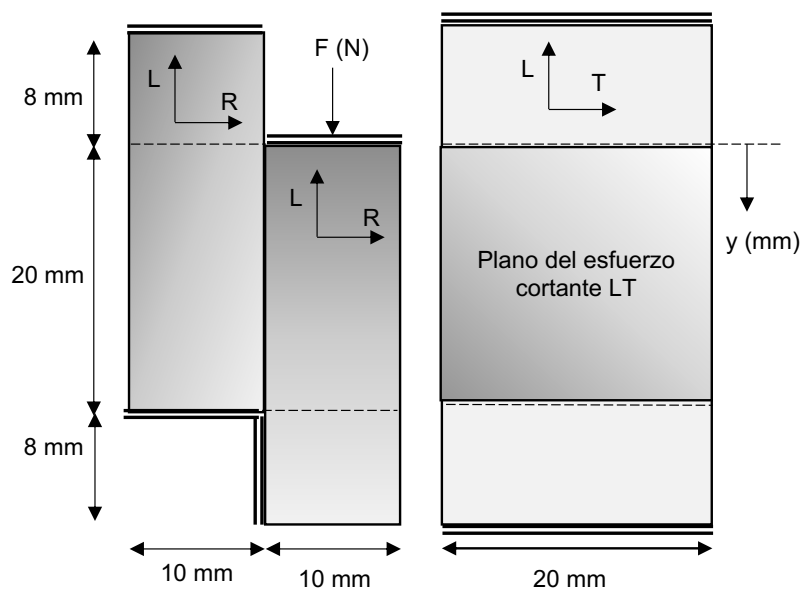


Figura 3. Diagrama de las probetas para pruebas de resistencia al esfuerzo cortante.
F = Fuerza; y = Deformación; R = Dirección radial; T = Dirección tangencial; L = Dirección longitudinal.
Fuente: Elaboración propia.

Las pruebas de resistencia al esfuerzo cortante adaptaron la norma ASTM D905-08(2021) (American Society for Testing and Materials [ASTM], 2021). Las probetas se posicionaron en el dispositivo para pruebas de esfuerzo cortante (Figura 4) y fueron solicitadas en compresión paralela a la dirección de la fibra hasta la ruptura. Para tal fin, se empleó una máquina de ensayos universal Tensilon Orientec RTC-125 (A & D Company Limited, Japón), con capacidad de carga de 25 kN. La velocidad de aplicación de la herramienta de carga fue de 1 mm s^{-1} . La frecuencia de captura de datos fue de 3 Hz.



Figura 4. Dispositivo para pruebas de resistencia al esfuerzo cortante.

Fuente: Elaboración propia.

Los diagramas fuerza-deformación fueron registrados para su análisis posterior. Los datos fueron capturados y tratados con el programa Tensilon Advanced Controller for Testing (A & D Company Limited, Japón). El esfuerzo cortante se calculó con la ecuación 1 (Meethaworn *et al.*, 2022):

$$\tau = \frac{F_{\max}}{A} \quad (1)$$

donde τ = Esfuerzo cortante (N m^{-2}), $F_{\max}$ = Fuerza máxima (N) y A = Área en esfuerzo cortante (m^2). La retención de resistencia al esfuerzo cortante se calculó con la ecuación 2 (Alamsyah *et al.*, 2021):

$$R_{\tau} = \frac{\tau_{\text{modificada}}}{\tau_{\text{madera sólida}}} \times 100 \quad (2)$$

donde R_r = Retención de resistencia al esfuerzo cortante (%), $\tau_{modificada}$ = Esfuerzo cortante de la madera modificada ($N\ m^{-2}$) y $\tau_{madera\ sólida}$ = Esfuerzo cortante de la madera sólida ($N\ m^{-2}$). De los extremos de las probetas, se recortaron segmentos de 60 mm de largo para determinar el contenido de humedad (ISO 13061-1) (ISO, 2014) y la densidad aparente (ISO 13061-2) (ISO, 2017). Se recortaron segmentos con dimensiones de 20 mm $\times$ 20 mm $\times$ 20 mm, y las micrografías de sus secciones transversales fueron examinadas con un microscopio electrónico MiniscopeTM3030Plus (Hitachi, Japón). Sus fotografías macroscópicas fueron tomadas con un microscopio digital VHX-1000 (Keyence, USA).

Diseño experimental

Las variables de entrada fueron la densidad y la resistencia al esfuerzo cortante de la madera sólida (S) y se agruparon en una muestra definida como grupo de control. Las variables de salida fueron estos mismos parámetros determinados en probetas de cinco configuraciones: L = Madera laminada, L+F = Madera laminada y reforzada, D = Madera densificada, DL = Madera densificada y laminada, DL+F = Madera densificada laminada y reforzada.

A partir de los resultados de seis réplicas, por cada muestra se calculó su media (μ), su desviación estándar (σ) y su coeficiente de variación ($CV = \sigma/\mu$). Se realizaron pruebas de normalidad de la distribución de las muestras con el criterio de demarcación de considerar una distribución normal si los valores estandarizados del sesgo (SE) y del apuntamiento (AE) se sitúan al interior del intervalo $[-2 < SE, AE < +2]$. Se realizaron pruebas de verificación (Ver-var) y de análisis de varianza (Anova) para contrastar la hipótesis nula $H_0: \sigma_1 = \sigma_2$ con la alterna $H_A: \sigma_1 \neq \sigma_2$, donde σ es la desviación estándar y los subíndices 1 y 2 corresponden a las muestras en contrastación. El criterio de demarcación para estas pruebas fueron valores de $p\ (\alpha = 0.05) > 0.05$ para considerar que no existen diferencias estadísticamente significativas, con un nivel de 95% de confianza. Para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras, se practicaron pruebas de rangos múltiples (RM) con el criterio de demarcación de que no existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X.

En lo sucesivo, y cuando así convenga, para aligerar la lectura el término resistencia al esfuerzo cortante (τ) será sustituido por el de esfuerzo en cortante. Igualmente, los términos referidos a las diferentes configuraciones y/o tratamientos se sustituirán por sus siglas definidas en el diseño experimental y/o en la Figura 2.

Resultados

La sección transversal de una probeta de madera sólida de *C. japonica* muestra zonas de crecimiento bien diferenciadas y con transiciones abruptas entre las capas de crecimiento temprana y tardía (Figura 5a), de tal forma que esta especie se caracteriza por la heterogeneidad de su estructura anatómica, lo que resulta en una amplia variabilidad en sus propiedades mecánicas (Vivian *et al.*, 2023).

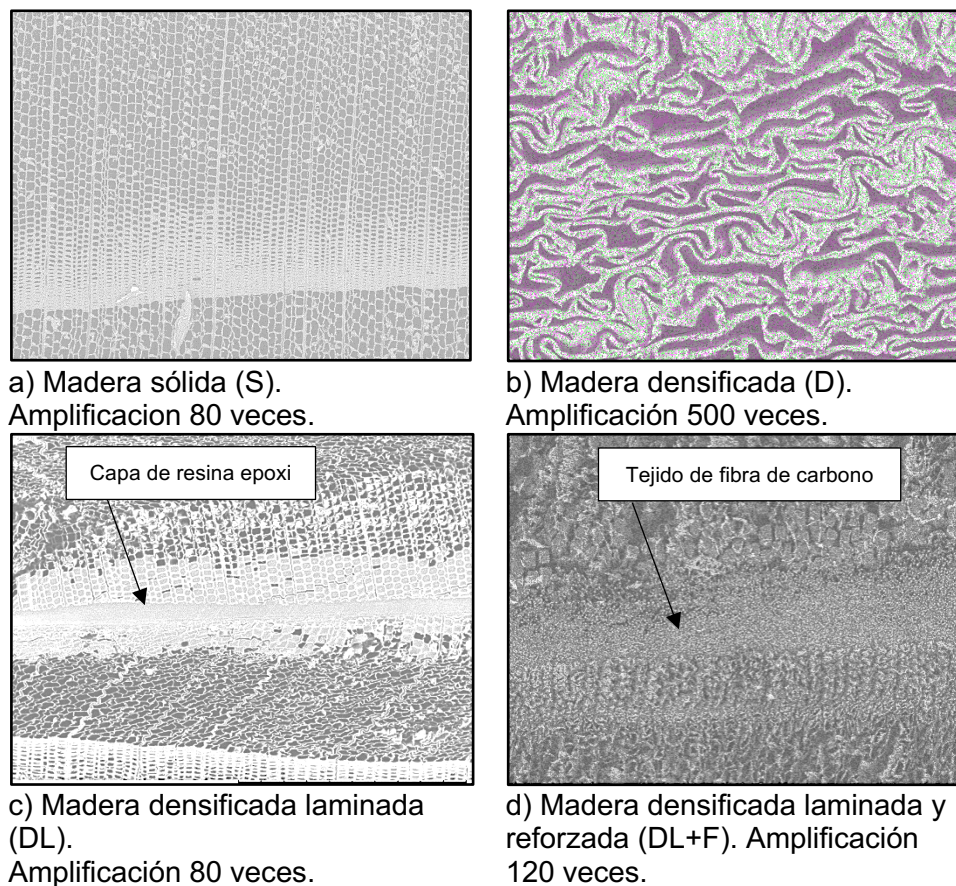


Figura 5. Secciones transversales de probetas de *Cryptomeria japonica*.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez densificada, la estructura de la madera se observa más homogénea a escala meso anatómica. El coeficiente de densificado de 50% logró un reacomodo de las paredes celulares sin dañar o destruir el tejido leñoso (Figura 5b). Este efecto resulta en el incremento de su densidad y, en consecuencia, en un aumento en sus características mecánicas (Cabral *et al.*, 2022; Meethaworn *et al.*, 2022).

La formación de uniones de madera implica cinco fenómenos relacionados: humectación de la superficie por el adhesivo líquido, extensión del adhesivo, transferencia entre células, penetración y solidificación (Nkeuwa *et al.*, 2022). El laminado permitió ensamblar dos componentes de madera en las probetas con una penetración de la resina epoxi en el plano longitudinal-tangencial de 15 a 20 células en promedio. La adherencia mecánica entre las interfaces de la madera-adhesivo combinada con la penetración de la resina entre las células de la madera (Figura 5c) resulta en un aumento de su resistencia al esfuerzo cortante en la madera laminada, pero no necesariamente en las otras configuraciones.

Por su parte, la incorporación de una capa de tejido de fibra de carbono adherida con resina epoxi, para formar la madera densificada laminada y reforzada (Figura 5d), resultó en un multimaterial en el cual se incorporan las propiedades de la madera, la resina y la fibra de carbono. Sin embargo, ese arreglo interrumpe la continuidad del tejido leñoso de *C. japonica*. La mejora tecnológica derivada de esta modificación dependerá del tipo de sollicitación mecánica a la cual esté expuesta la pieza en cuestión (Saad & Lengyel, 2022).

La densidad de la madera sólida definida como grupo de control y las cinco configuraciones consideradas como tratamientos, así como su resistencia (ecuación 1) y retención de resistencia al esfuerzo cortante (ecuación 2) se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Resultados de la densidad y del esfuerzo cortante.

	S	L	L+F	D	DL	DL+F
	Densidad ρ_{CH} (kg m^{-3})					
μ	344	345	346	489	482	468
σ	10	5	12	18	15	10
CV	(3)	(2)	(3)	(4)	(3)	(2)
	Esfuerzo cortante τ (MN m^{-2})					
μ	9.651	11.138	9.775	10.708	9.033	8.260
σ	0.630	0.932	0.830	0.620	0.645	0.255
CV	(7)	(8)	(9)	(6)	(7)	(3)
	Retención de resistencia al esfuerzo cortante R (%)					
	100	115	101	111	94	86

Nota. S = Madera sólida; L = Madera laminada; L+F = Madera laminada y reforzada; D = Madera densificada; DL = Madera densificada y laminada; DL+F = Madera densificada laminada y reforzada; μ = Media; σ = Desviación estándar; CV = Coeficiente de variación en porcentaje y entre paréntesis. Contenido de humedad (CH) = 11%.

Fuente: Elaboración propia.

Discusión

La Tabla 2 presenta los resultados del análisis estadístico propuesto en el diseño experimental y los resultados de las pruebas para las diferentes muestras observadas: de normalidad (sesgo estandarizado [SE] y curtosis estandarizada [CE]), de igualdad de varianza (ver-var) y de análisis de varianza (Anova).

Tabla 2. Análisis estadístico.

Material	SE	AE	Ver-var	Anova	RM	
	[-2, +2]	[-2, +2]	$P(\alpha = 0.05)$	$P(\alpha = 0.05)$		
	Densidad ρ_{CH} (kg m^{-3})					
S	-0.583	-0.966	0.923 [#]	<0.001*	X	
L	-0.143	-0.373			X	
L+F	0.608	-0.153			X	
DL+F	1.412	1.930				X
DL	1.776	1.850			X	X
D	-0.316	0.348				X
	Esfuerzo cortante τ (MN m^{-2})					
DL+F	0.153	-0.182	0.533 [#]	<0.001*	X	
DL	0.352	-0.238			X	X
S	1.377	0.898				X
L+F	0.237	-0.427			X	
D	0.922	-0.435				X
L	-1.372	1.114				X

Nota. S = Madera sólida; L = Madera laminada; L+F = Madera laminada y reforzada; D = Madera densificada; DL = Madera densificada y laminada; DL+F = Madera densificada laminada y reforzada; SE = Sesgo estandarizado; AE = Apuntamiento estandarizado; Ver-var = Verificación de varianza; Anova = Análisis de varianza; RM = Rangos múltiples. [#] $P > 0.05$: No existe una diferencia estadísticamente significativa con un nivel de 95% de confianza. * $p < 0.05$: Existe una diferencia estadísticamente significativa con un nivel de 95% de confianza. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's.

Fuente: Elaboración propia.

Las pruebas de normalidad indican que las distribuciones de las seis muestras estudiadas son normales ($-2 < \text{SE}$ y $\text{AE} < +2$). Por su parte, las pruebas de verificación de la varianza revelan que las desviaciones estándar de todas las muestras no presentan diferencias estadísticamente significativas ($p_{(\alpha = 0.05)} > 0.05$). En cambio, las pruebas de análisis de varianza evidencian que sí se distinguen entre ellas ($p_{(\alpha = 0.05)} < 0.05$).

Al mismo tiempo, las pruebas de rangos múltiples indican que las densidades de la madera sólida y las diferentes configuraciones son similares. A su vez, las densidades de la madera densificada y sus compuestos se agrupan para D y DL, y para DL y DL+F; por otro lado, en los esfuerzos cortantes se agrupan las muestras DL+F y DL, así como DL, S y L+F. Los resultados para la madera densificada y la madera laminada son independientes.

Densidad

La densidad de la madera L y L+F son similares a las de la madera sólida (Figura 6a). Es decir, la adición de la resina epoxi no modifica de manera significativa su densidad. En cambio, se observa un incremento en la densidad de las probetas de madera densificada, laminada y reforzada. En promedio, la diferencia entre las maderas S, L y L+F y las densificadas D, DL y DL+F es 28%, correspondiente a un coeficiente de densificado de 50%. Así, este aumento en la densidad se verá reflejado en el incremento de la resistencia al esfuerzo cortante en los tratamientos con madera densificada.

La variabilidad de la densidad es explicada por sus coeficientes de variación (Figura 6b), los cuales se sitúan para las maderas sin densificar S, L y L+F en el intervalo de 2% a 3%; y para las maderas densificadas D, DL y DL+F, el coeficiente se incrementa a un intervalo que va de 2% a 4%. Por consiguiente, los tratamientos aplicados a la madera en estado sólido modifican la magnitud de su densidad, pero no alteran su variabilidad. Estos resultados concuerdan con los del análisis estadístico (Tabla 2). Si bien son datos comparables, se observan diferencias específicas en los tratamientos donde se incluye madera densificada.

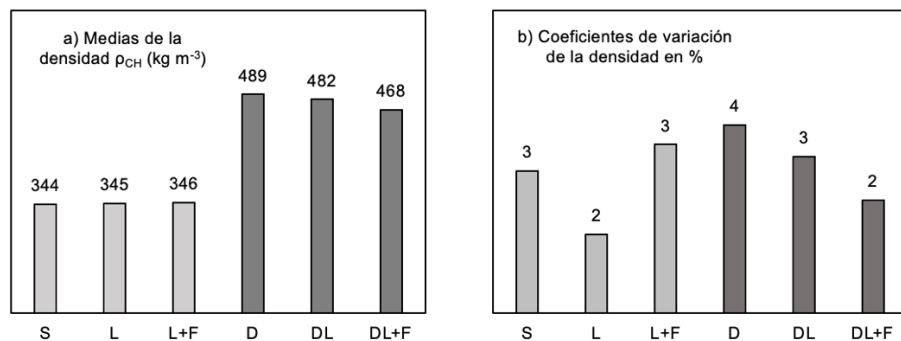


Figura 6. a) Medias de densidades; b) Coeficientes de variación.
Fuente: Elaboración propia.

Resistencia al esfuerzo cortante

La resistencia al esfuerzo cortante de la madera densificada aumenta un 11%, la laminada un 19% y la reforzada un 1% en comparación con la madera sólida sin tratamiento (Figura 7a). En cambio, en relación con la madera densificada, el esfuerzo cortante de la madera densificada y laminada disminuye 16% y el de la madera DL+F decrece 23%. Si bien el esfuerzo cortante de la madera densificada aumenta, una vez laminada y/o reforzada, este parámetro disminuye (Figura 7b).

Por su parte, los coeficientes de variación del grupo de control y de los tratamientos L, L+F, D y DL fluctúan entre 6% y 8%, con excepción del coeficiente de la madera DL+F, que es de 3%. Estos resultados confirman los del análisis estadístico (Tabla 2). Si bien son datos comparables, se observan diferencias específicas en los cinco tratamientos.

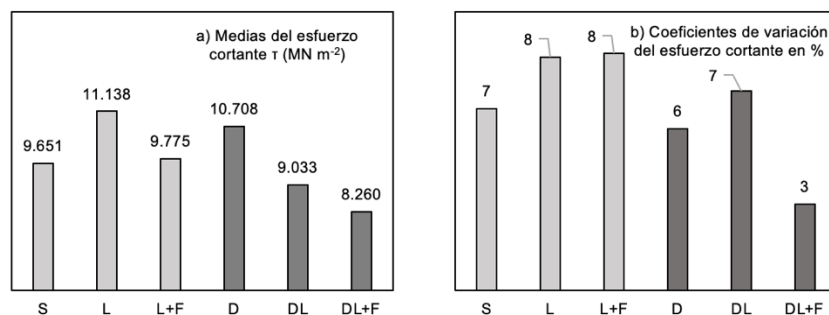


Figura 7. a) Medias de esfuerzos cortantes; b) Coeficientes de variación.
Fuente: Elaboración propia.

El comportamiento mecánico de la madera sólida y de las cinco configuraciones se puede observar desde dos perspectivas. La primera consiste en examinar la zona elástica de la relación fuerza-deformación en la cual se puede definir la rigidez elástica aparente ($\Delta F/\Delta y$) correspondiente al dominio lineal (Figuras 8a y 8b). Así, la rigidez elástica aparente de la madera laminada y laminada reforzada se incrementa en relación con la de la madera sólida. En el mismo sentido, la rigidez elástica aparente de la madera densificada y laminada aumenta respecto a la de la madera densificada, pero una vez que se agrega el tejido de fibra de carbono como refuerzo, este parámetro disminuye (Figuras 8a y 8b).

Además, después de una falla inicial de la sección solicitada al esfuerzo cortante, se forman áreas de recuperación con una cierta resistencia residual al final del proceso de fuerza-deformación. Sin embargo, a pesar de su recuperación parcial, la probeta, que se considera un sistema estructural en equilibrio, pierde su cohesión interna y se observan desgarramientos en la madera. En comparación con la madera laminada y reforzada con fibra de carbono, tanto la madera sólida como la densificada extienden su deformación en la zona plástica y son más dúctiles.

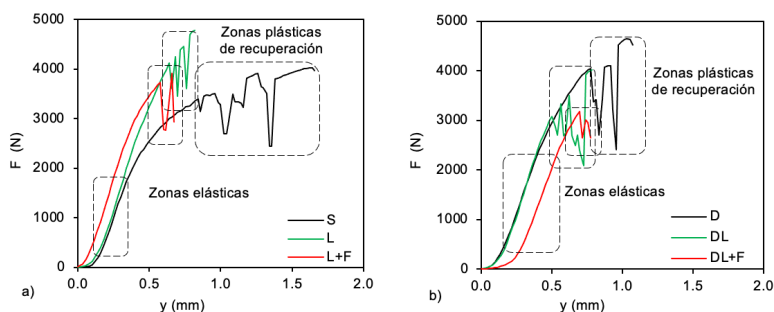


Figura 8. Diagrama fuerza-deformación: a) Madera sólidas S, L y L+F; b) Maderas densificadas D, DL y DL+F.
Fuente: Elaboración propia.

Aplicando un procedimiento experimental similar al de la presente investigación, Alamsyah *et al.* (2021) reportan resistencias al esfuerzo cortante de *Enterolobium cyclocarpum*, *Paraserianthes falcataria*, *Shorea sp.*, *Toona sinensis*, *Gmelia arborea*, *Pinus merkusii*, *Acacia mangium* y *Acacia hybrid*. Las densidades de estas maderas fluctúan desde 300 kg m^{-3} hasta 700 kg m^{-3} . Los esfuerzos cortantes están detallados para probetas laminadas con diferentes tipos de adhesivos: acetato de polivinilo en emulsión (APE), urea formaldehído (UF), isocianato polimérico acuoso (IPA) y resorcinol formaldehído (RF). Para posicionar los resultados de la presente investigación respecto a los datos de estos autores, las dispersiones de sus magnitudes se representan gráficamente en la Figura 9 y se comparan con los resultados del grupo de control y de los cinco tratamientos.

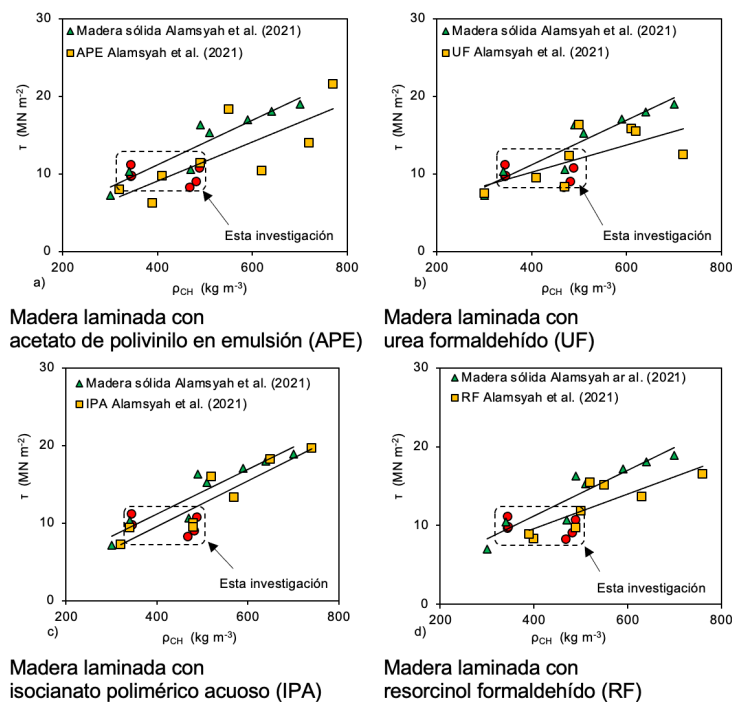


Figura 9. Esfuerzo cortante (τ) en función de la densidad (ρ_{CH}).
 Fuente: Elaboración propia con base en Alamsyah *et al.* (2021).

En la Figura 9 se observa que los resultados de esta investigación se agrupan cerca de los valores de baja densidad de la madera sólida y de los laminados con diferentes adhesivos reportados por Alamsyah *et al.* (2021). Esta relación es congruente con los valores de los esfuerzos cortantes. Así, los valores de resistencia mecánica de las configuraciones aquí propuestas pueden ser transferidas a laminados de dimensiones de empleo, considerando los ajustes recomendados por la normativa de la industria de la edificación con madera que emplea piezas de tamaño estructural.

Rigidez elástica aparente

Los detalles de las zonas elásticas aparentes son presentados en las Figuras 10a y 10b. Ahí se observa que las pendientes de las correlaciones lineales entre la fuerza y la deformación de las zonas elásticas aparentes de la madera sólida ($F = 8273$ y -1075 , con $R^2 = 0.99$) y la madera laminada ($F = 8932$ y -1089 , con $R^2 = 0.99$) son similares, mientras que la madera laminada y reforzada se distingue de ellas ($F = 9378$ y -564 , con $R^2 = 0.99$) (Figura 10a).

De manera análoga, las pendientes correspondientes a la madera densificada ($F = 8052$ y -893 , con $R^2 = 0.99$) y laminada son similares ($F = 8602$ y -1081 , con $R^2 = 0.99$) (Figura 10b). En cambio, la correlación de la madera densificada laminada y reforzada se distingue de ellas ($F = 7578$ y -1776 , con $R^2 = 0.99$).

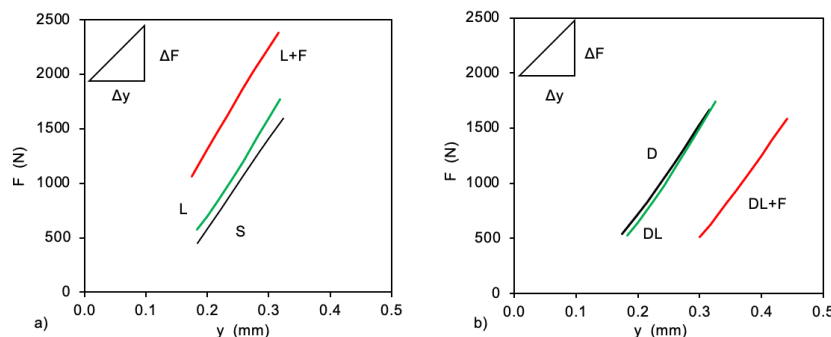


Figura 10. Comparativo de la rigidez elástica aparente en la zona elástica ($\Delta F/\Delta y$) del diagrama fuerza-deformación. a) Maderas sólidas S, L y L+F; b) Maderas densificadas D, DL y DL+F.

Fuente: Elaboración propia.

Respecto a la rigidez ($\Delta F/\Delta y$) de la madera sólida de *C. japonica*, la de la madera laminada se incrementa 8%. A su vez, la de la madera laminada y reforzada aumenta 14% (Figura 11a). En relación con la madera densificada, la rigidez elástica de la madera densificada y laminada aumenta 8%, pero la rigidez de la madera densificada laminada y reforzada disminuye 5%. Estos resultados pueden ser aplicados en el diseño y cálculo de piezas de madera que trabajan en esfuerzos cortantes y requieren un comportamiento elástico.

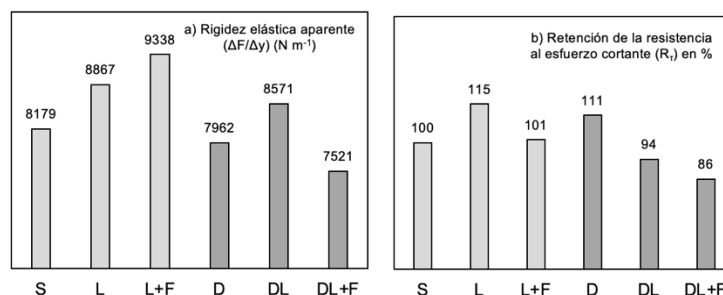


Figura 11. Comparativo de: a) Rigidez elástica aparente ($\Delta F/\Delta y$); b) Retención de la resistencia al esfuerzo cortante (R_t).

Fuente: Elaboración propia

Retención de la resistencia al esfuerzo cortante

En la presente investigación se aplicó solo resina epoxi como adhesivo. Así, la verificación de la resistencia al esfuerzo cortante de las diferentes configuraciones concierne a la madera sólida como grupo de control con $R_t = 100\%$, en contraste con los cinco tratamientos (ecuación 2).

La Figura 11b presenta un comparativo de la retención de la resistencia al esfuerzo cortante. El rendimiento de la junta adhesiva viene determinado por las condiciones físicas y mecánicas de la superficie del material, ya que el adhesivo tiene la función de pegar dos superficies (Alamsyah *et al.*, 2021).

La retención de la resistencia al esfuerzo cortante de la madera laminada y densificada aumentan comparativamente con la de la madera sólida. La de la madera laminada y reforzada es similar, mientras que las resistencias de las maderas densificada y laminada y densificada y reforzada son menores respecto a la de la madera sólida.

Ruptura

En la madera sólida, la ruptura se desarrolló en el plano longitudinal-tangencial paralelo a sus capas de crecimiento (Figura 12a). En la falla inicial del proceso de fuerza-deformación, se observó un desgarramiento entre fibras y un desprendimiento completo en la zona de recuperación plástica (Figuras 8a y 8b).

La interfaz entre la madera adhesiva y la madera laminada con resina epoxi mostró pequeñas grietas (Figura 12b). Por otro lado, en el plano de contacto madera-resina-fibra de carbono, la madera sólida laminada y reforzada exhibió un desprendimiento evidente entre el tejido de refuerzo y la superficie (Figura 12c). El tejido de fibra de carbono es extremadamente resistente al esfuerzo de tensión, pero no lo es al esfuerzo cortante, lo que provoca el desprendimiento de sus fibras.

Por su parte, la madera laminada que empleó resina epoxi como adhesivo presentó pequeñas rasgaduras entre la interfaz madera-adhesivo-madera (Figura 12b) (Frihart, 2009; Slabohm *et al.*, 2022). En cambio, la madera sólida laminada y reforzada mostró un claro desprendimiento entre el tejido de refuerzo y la superficie en el plano de contacto madera-resina-fibra de carbono (Figura 12c).

La ruptura en la madera densificada se localizó fuera del plano sometido al esfuerzo cortante (Figura 12d). La ruptura en la madera densificada y laminada no se realiza en el plano de la interfaz madera-adhesivo-madera (Figura 12e). En el caso de la madera densificada laminada y reforzada, la ruptura se realiza por el desprendimiento de la capa de fibra de carbono y sus capas de resina epoxi, las cuales se desprenden de la madera sólida (Figura 12f).

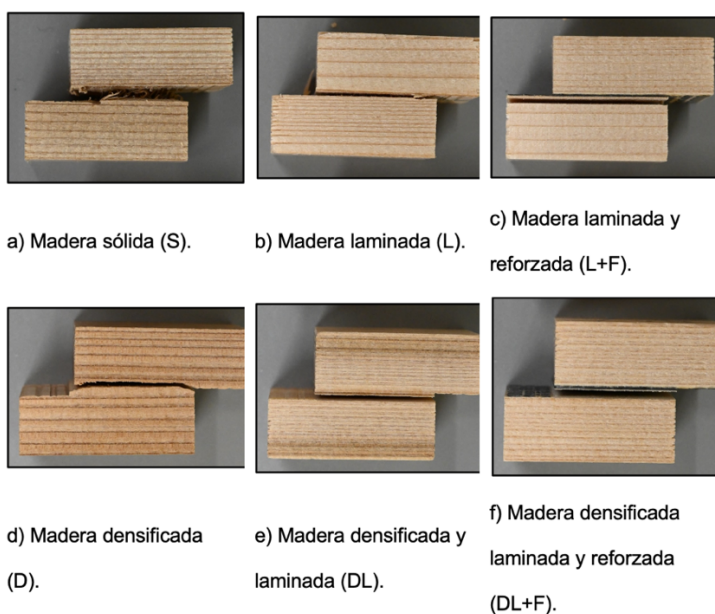


Figura 12. Ruptura en probetas de madera sólida y modificada de *Cryptomeria japonica*.
Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

Los tratamientos de densificación, laminado y reforzado aumentan en promedio 24% la densidad de la madera sólida de *C. japonica*. El laminado y el densificado aumentan la resistencia al esfuerzo cortante en 15% y 11%, respectivamente, pero la incorporación de tejido de fibra de carbono reduce la resistencia en 14%.

Comparativamente con la resistencia al esfuerzo cortante de la madera sólida, la resistencia de la madera laminada y densificada se incrementa 1%. En cambio, la resistencia de la madera reforzada con fibra de carbono disminuye 14%. La retención de la resistencia al esfuerzo cortante de *C. japonica* aumenta con el laminado 15% y con el densificado 11%. Empero, disminuye en la madera densificada y laminada 6% y en la reforzada 14%.

Agradecimientos

La investigación fue patrocinada por el Instituto de Tecnología de la Madera de la Universidad Prefectural de Akita, en Japón, y por la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en México. Se agradece a Kayo Kudo y Ryuto Kumamoto por su cooperación en los trabajos de laboratorio.

Conflictos de interés

Todos los autores declaran no tener conflicto de interés potenciales, reales o percibidos en el manuscrito.

Referencias

- Alamsyah, E. M., Suhaya, Y., Sutrisno, Hidayat, Y., Tanaka, T., & Yamada, M. (2021). Investigation of the adhesion performance of some fast-growing wood species based on their wettability. *Open Agriculture*, 6(1), 392-399. <https://doi.org/10.1515/opag-2021-0013>
- American Society for Testing and Materials (ASTM). (2021). ASTM D905-08(2021). *D905 Standard test method for strength properties of adhesive bonds in shear by compression loading*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D0905-08R21>
- Aristri, M. A., Lubis, M. A. R., Yadav, S. M., Antov, P., Papadopoulos, A. N., Pizzi, A., Fatriasari, W., Ismayati, M., & Iswanto, A. H. (2021). Recent developments in lignin- and tannin-based non-isocyanate polyurethane resins for wood adhesives. a review. *Applied Sciences*, 11(9), 4242. <https://doi.org/10.3390/app11094242>
- Bernaczyk, A., Wagenführ, A., Terfloth, C., Lincke, J., Krystofiak, T., & Niemz, P. (2023). Investigations into the influence of temperature on the tensile shear strength of various adhesives. *Materials*, 16(18), 6173. <https://doi.org/10.3390/ma16186173>
- Cabral, J. P., Kafle, B., Subhani, M., Reiner, J., & Ashraf, M. (2022). Densification of timber: a review on the process, material properties, and application. *Journal of Wood Science*, 68(20). <https://doi.org/10.1186/s10086-022-02028-3>
- Feujofack, B. V., & Loss, C. (2023). Experimental campaign on the mechanical properties of Canadian small clear spruce-pine-fir wood: experimental procedures, data curation, and data description. *Data in Brief*, 48, 109064. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2023.109064>
- Frihart, C. R. (2009). Adhesive groups and how they relate to the durability of bonded wood. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 23(4), 601-617. <https://doi.org/10.1163/156856108X379137>
- Gašparík, M., Gaff, M., Ruman, D., Záborský, V., Kasickova, V., Sikora, A., & Šticha, V. (2017). Shear bond strength of two-layered hardwood strips bonded with polyvinyl acetate and polyurethane adhesives. *BioResources*, 12(1), 495-513. <https://doi.org/10.15376/biores.12.1.495-513>
- Gondaliya, A., Alipoormazandarani, N., Kleiman, M., & Foster, E. J. (2023). Sustainable compressed biocomposite: review on development and novel approaches. *Materials Today Communications*, 35, 105846. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.105846>
- Guo, D., Guo, N., Fu, F., Yang, S., Li, G., & Chu, F. (2022). Preparation and mechanical failure analysis of wood-epoxy polymer composites with excellent mechanical performances. *Composites Part B: Engineering*, 235, 109748. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.109748>
- Hänsel, A., Sandak, J., Sandak, A., Mai, J., & Niemz, P. (2022). Selected previous findings on the factors influencing the gluing quality of solid wood products in timber construction and possible developments: a review. *Wood Material Science & Engineering*, 17(3), 230-241. <https://doi.org/10.1080/17480272.2021.1925963>
- International Organization for Standardization (ISO). (2012). *ISO 3129:2012. Wood - Sampling methods and general requirements for physical and mechanical testing of small clear wood specimens*. International Organization for Standardization. <https://www.iso.org/standard/52489.html>
- International Organization for Standardization (ISO). (2014). *ISO 13061-1:2014. Physical and mechanical properties of wood - Test methods for small clear wood specimens - Part 1: Determination of moisture content for physical and mechanical tests*. International Organization for Standardization. http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=60063
- International Organization for Standardization (ISO). (2017). *ISO 13061-2:2014/Amd 1:2017. Physical and mechanical properties of wood - Test methods for small clear wood specimens - Part 2: Determination of density for physical and mechanical tests - Amendment 1*. International Organization for Standardization. http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=60064
- Irlle, M. (2019). A review of methods to increase the flexibility of wood. *Bulletin of the Transilvania University of Braşov, Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering*, 12(61), 53-62. <https://doi.org/10.31926/but.fwi.2019.12.61.2.4>
- Kawecki, B., & Sumorek, A. (2022). Study on profitability of combining wood and CFRP into composite based on mechanical performance of bent beams. *Applied Sciences*, 12(20), 10304. <https://doi.org/10.3390/app122010304>

- Meethaworn, B., Srivaro, S., & Khongtong, S. (2022). High-performance adhesive joint made from densified wood. *Polymers*, 14(3), 515. <https://doi.org/10.3390/polym14030515>
- Nkeuwa, W. N., Zhang, J., Semple, K. E., Chen, M., Xia, Y., & Dai, C. (2022). Bamboo-based composites: a review on fundamentals and processes of bamboo bonding. *Composites Part B: Engineering*, 235, 109776. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.109776>
- Saad, K., & Lengyel, A. (2022). Strengthening timber structural members with CFRP and GFRP: a state-of-the-art review. *Polymers*, 14(12), 2381. <https://doi.org/10.3390/polym14122381>
- Schubert, M., Panzarasa, G., & Burgert, I. (2023). Sustainability in wood products: a new perspective for handling natural diversity. *Chemical Reviews*, 123(5), 1889-1924. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00360>
- Shirmohammadi, M., & Leggate, W. (2022). Review of existing methods for evaluating adhesive bonds in timber products. En M. Gong (ed.), *Engineered Wood Products for Construction*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.92960>
- Slabohm, M., Mai, C., & Militz, H. (2022). Bonding acetylated veneer for engineered wood products-a review. *Materials*, 15(10), 3665. <https://doi.org/10.3390/ma15103665>
- Sotomayor-Castellanos, J. R. (2017). Densificado higro-termo-mecánico de madera de *Gyrocarpus americanus*. Evaluación por ultrasonido. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 43(2), 156-164. https://repositorio.inta.gob.ar/xmlui/bitstream/handle/20.500.12123/15004/RIA_2017_VOLUMEN43_N%c2%ba2_p.156-164.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Sotomayor-Castellanos, J. R., Hadachi, K., & Kudo, K. (2024). Indicadores de flexibilidad de madera laminada, densificada y reforzada con fibra de carbono. *Ciencia Nicolaita*, 90, 143-156. <https://doi.org/10.35830/cn.vi90.782>
- Steiger, R., Gehri, E., & Richter, K. (2010). Quality control of glulam: shear testing of bondlines. *European Journal of Wood Products*, 68, 243-256. <https://doi.org/10.1007/s00107-010-0456-4>
- Svoboda, T., Sikora, A., Záborský, V., & Gaffová, Z. (2019). Laminated veneer lumber with non-wood components and the effects of selected factors on its bendability. *Forests*, 10(6), 470. <https://doi.org/10.3390/f10060470>
- Vivian, M. A., Modes, K. S., Fogliatto, M. M., Schlichting, R. C., Corrêa, R., Grosskopf, É. J., & Dobner Júnior, M. (2023). Propriedades físicas, químicas e anatômicas da madeira de *Cryptomeria japonica*. *Brazilian Journal of Forestry Research*, 43, 1-10. <https://doi.org/10.4336/2023.pfb.43e202002096>