

Ciencia Nicolaita 90

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Indicadores de flexibilidad de madera laminada, densificada y reforzada con fibra de carbono

Flexibility indicators of laminated, densified and carbon fiber reinforced wood

Javier Ramón Sotomayor Castellanos*, Koji Adachi, Kayo Kudo

Para citar este artículo: Sotomayor Castellanos JR, Adachi K, Kudo K (2024). Indicadores de flexibilidad de madera laminada, densificada y reforzada con fibra de carbono. *Ciencia Nicolaita* 90: 143-156.

DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi90.782>

Historial del artículo



Recibido: 11 de diciembre de 2023

Aceptado: 26 de febrero de 2024

Publicado en línea: abril 2024



Ver material suplementario



***Correspondencia de autor:** javier.sotomayor@umich.mx



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

Indicadores de flexibilidad de madera laminada, densificada y reforzada con fibra de carbono

Flexibility indicators of laminated, densified and carbon fiber reinforced wood

Javier Ramón Sotomayor Castellanos^{1*}, Koji Adachi², Kayo Kudo³

¹ Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México. ORCID: 0000-0002-1527-8801. E-mail: javier.sotomayor@umich.mx

² Instituto de Tecnología de la Madera, Universidad Prefectoral de Akita, Japón. ORCID: 0000-0002-9962-5750

³ Instituto de Tecnología de la Madera, Universidad Prefectoral de Akita, Japón.

Resumen

En este trabajo se determinaron los módulos de elasticidad y de ruptura, así como los índices de ductilidad y de flexibilidad de la madera de *Cryptomeria japonica*. Se prepararon probetas de madera sólida y densificada, se laminaron con resina epoxi y se reforzaron con fibra de carbono. Se realizaron pruebas de flexión estática en las direcciones radial y tangencial respecto a la dirección transversal de la carga. El densificado, laminado y reforzado de la madera de *C. japonica* incrementa su módulo de elasticidad y de ruptura. En contraste, estas modificaciones disminuyen sus índices de ductilidad y de flexibilidad. En el mismo sentido, los parámetros determinados en la dirección tangencial son mayores que los determinados en la dirección radial.

Palabras clave: módulo de elasticidad, módulo de ruptura, índice de ductilidad, índice de flexibilidad, madera de *Cryptomeria japonica*.

Abstract

In this report it was determined the modulus of elasticity, rupture, ductility and flexibility indices of *Cryptomeria japonica* wood. Solid and densified wood specimens were prepared, laminated with epoxy resin, and reinforced with carbon fiber. Static bending tests were performed in the radial and tangential directions with respect to the transverse direction of loading. The densification, laminating and reinforcement of *C. japonica* wood increases its modulus of elasticity and modulus of rupture. In contrast, these modifications decrease its ductility and flexibility indices. In addition, the parameters determined in the tangential direction are higher than those determined in the radial direction.

Keywords: modulus of elasticity, modulus of rupture, ductility index, flexibility index, *Cryptomeria japonica* wood.

*Autor de correspondencia: javier.sotomayor@umich.mx
Copyright © Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Introducción

Los módulos de elasticidad y de ruptura, así como los índices de ductilidad y de flexibilidad en la madera laminada, densificada y/o reforzada dependen de varios factores, incluyendo la especie, la composición laminar, la intensidad del densificado, las características del adhesivo y las propiedades del material agregado para convertirla en madera de ingeniería (Frihart, 2009; Kliger *et al.*, 2016; Kandler *et al.*, 2018; Śliwa-Wieczorek *et al.*, 2021). De igual modo, las condiciones del procesamiento influyen en el comportamiento mecánico del material resultante y los usos que se le puedan dar en la elaboración de muebles y en la industria de la construcción (Irlle, 2019; Svoboda *et al.*, 2019).

Existen trabajos en los que se comparan las propiedades de la madera aserrada y la madera con algún tipo de modificación. Los hallazgos de estas investigaciones muestran qué respecto a la madera aserrada, la madera laminada reduce su heterogeneidad estructural (Kandler *et al.*, 2018); la madera densificada incrementa su resistencia mecánica (Gaff *et al.*, 2016); el empleo de resina epoxi consolida las conexiones de la madera laminada (Karaman *et al.*, 2021); y la incorporación de tejido de fibra de carbono mejora sus propiedades mecánicas (Wang *et al.*, 2019). La combinación de estas cuatro modificaciones resulta en un material compuesto de madera densificada-laminada (Sikora *et al.*, 2017) y/o reforzada (Schober *et al.*, 2015). Estas mejoras tecnológicas son evaluadas con sus indicadores de flexibilidad, por ejemplo, los módulos de elasticidad y de ruptura (Kretschmann y Hernández, 2006), el índice de ductilidad (Novosel *et al.*, 2021) y el de flexibilidad (Gaff *et al.*, 2016).

Las propiedades de flexibilidad de la madera de ingeniería están reportadas para vigas laminadas con dimensiones de empleo (Foraboschi, 2009; Manalo *et al.*, 2010; Gaff *et al.*, 2015) y vigas laminadas-reforzadas (Kliger *et al.*, 2016; Yusof y Rahman, 2017; Wang *et al.*, 2019; Wdowiak-Postulak y Brol, 2020; Saad y Lengyel, 2022). Entre otras técnicas de refuerzo, el uso de tejido de fibra de carbono para incrementar los módulos de elasticidad y de ruptura está reportado tanto para madera sólida (Yusof y Rahman, 2017), como para madera laminada (Śliwa-Wieczorek *et al.*, 2021) y para vigas laminadas de grandes dimensiones (Wdowiak-Postulak y Brol, 2020).

Otro tipo de investigaciones emplean probetas de pequeñas dimensiones y se enfocan en sus pro-

piedades físico-mecánicas y/o con configuraciones experimentales específicas para madera laminada (Bal, 2016; Sikora *et al.*, 2017; Sikora *et al.*, 2019), para madera densificada (Svoboda *et al.*, 2015; Bao *et al.*, 2017) y para madera reforzada (Svoboda *et al.*, 2019; Rescalvo *et al.*, 2020; Novosel *et al.*, 2021; Śliwa-Wieczorek *et al.*, 2021). En este contexto, es notoria la ausencia de estudios integrales sobre la flexibilidad de madera laminada, densificada y/o reforzada.

El objetivo de esta investigación fue determinar en probetas de madera sólida, laminada, densificada y/o reforzada, los siguientes parámetros: densidad, módulo de elasticidad, módulo de ruptura, índice de ductilidad e índice de flexibilidad. Para tal fin, se diseñó un experimento completamente al azar, homogéneo y balanceado, con datos derivados de pruebas de flexión estática de probetas de pequeñas dimensiones de la madera de *Cryptomeria japonica* (Thunb. ex L. f.) D. Don.

Materiales y métodos

Se adquirieron secciones de troncos de *C. japonica* en la Prefectura de Akita, Japón, con dimensiones de 200 mm de grueso, 300 mm de ancho y 1200 mm de longitud. El taxon botánico de la especie fue determinado en el Instituto de Tecnología de la Madera, de la Universidad Prefectoral de Akita, en Japón. Las secciones se recortaron en láminas de 10 mm, 20 mm y 40 mm de grosor por 150 mm de ancho y 410 mm de largo. Se prepararon seis tipos de placas de donde se recortaron las probetas, cabe mencionar que la madera estaba libre de defectos de crecimiento.

Para densificar la madera, las láminas se colocaron en una prensa Tensilon modelo TS-100 (Shon ai-Tekko, Japón), con capacidad de 100 toneladas. Las láminas se comprimieron en la dirección radial con una velocidad de prensado de 0,001 m min⁻¹ hasta alcanzar un espesor de 50% de su dimensión original (Coeficiente de densificado de 50%, Sotomayor, 2017). La presión aplicada osciló entre 30 y 50 MN m⁻². Una vez alcanzado el objetivo de densificado, las placas se mantuvieron en la prensa con temperatura de 120 °C durante 6 horas. Después de haber fabricado las placas, estas se enfriaron a temperatura de 20 °C por 12 horas.

Después de la fabricación de las placas, se recortaron probetas de 20 mm de ancho (base) por

20 mm de espesor (altura) y 320 mm de longitud (ISO 3129:2012, 2012) y se acondicionaron a temperatura de 20 °C y una humedad relativa del aire de 65% hasta que alcanzaron un peso constante. Las probetas se elaboraron solamente con madera de albura y se revisó que estuviesen libres de anomalías de crecimiento y de madera de duramen. Para cada configuración se prepararon tres probetas. La dirección radial y tangencial se definen respecto a los anillos de crecimiento en el plano radial-tangencial del plano leñoso (**Figura 1**).

Para fabricar las probetas laminadas, se unieron dos láminas de madera con dos capas de 22 g (200 g m⁻²) de resina epoxi E200 (Konishi, Japón; Guo *et al.*, 2022). La presión de compresión fue de 10 kg cm⁻², a una temperatura de prensado de 20 °C y con un tiempo de curado de 12 horas. Para reforzar las

probetas laminadas, se colocó en el plano radial-tangencial una capa de tejido de fibra de carbono (15 g; Nipon Oil Corporation, Japón).

De los extremos de las probetas, se recortaron segmentos de 60 mm de largo para determinar el contenido de humedad (ISO 13061-1, 2014) y la densidad aparente (ISO 13061-2, 2017). Se recortaron segmentos con dimensiones de 20 mm × 20 mm × 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).

Las pruebas de flexión estática consistieron en aplicar una fuerza a la probeta en medio de su portada de flexión hasta alcanzar su ruptura. Para tal fin, se empleó una máquina de ensayos universal

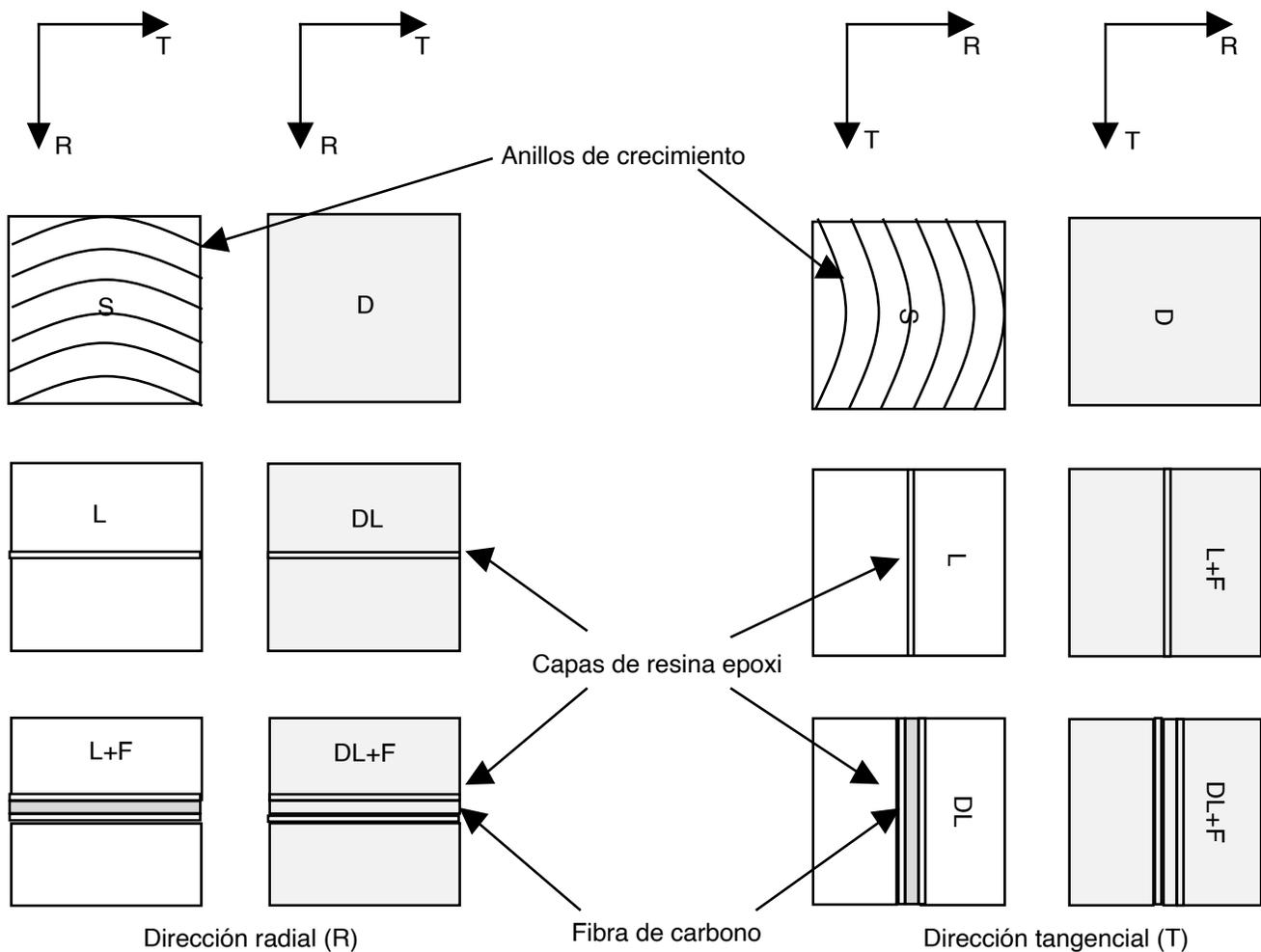


Figura 1. Configuraciones de las probetas. S = Madera sólida; L = Madera laminada; L+F = Madera laminada y reforzada; D = Madera densificada; DL = Madera densificada y laminada; DL+F = Madera densificada laminada y reforzada.

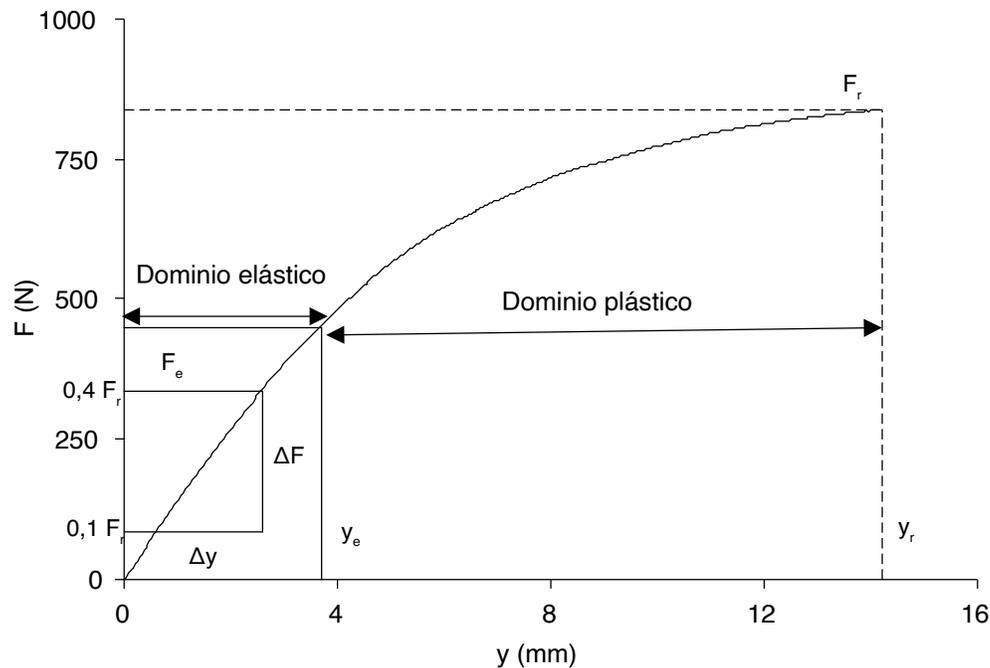


Figura 2. Diagrama fuerza (F) - deformación (y). La explicación de fórmulas y símbolos utilizados se presenta en la **Tabla 1**.

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 5 mm s^{-1} . La frecuencia de captura de datos fue de 3 Hz. La relación de la distancia entre apoyos y el espesor de la probeta (L/y) fue de 15. Los datos del diagrama esfuerzo-deformación (**Figura 2**, **Tabla 1**) fueron capturados y tratados con el programa Tensilon Advanced Controller for Testing (A & D Company Limited, Japón).

Resultados y discusión

A nivel macroscópico, las capas de crecimiento de las probetas de madera sólida se observan heterogéneas, regulares y sin fisuras (**Figura 3a**). En la madera densificada, esta estructura se percibe reacomodada y con diferentes capas formadas por células comprimidas de manera irregular (**Figura 3b**), principalmente la madera temprana. Por su parte, las probetas laminadas y/o densificada-laminada muestran las capas de resina epoxi adheridas de manera uniforme (**Figuras 3c** y **3d**). Igualmente, las probetas laminadas y/o reforzadas muestran uniones uniformes maderado-adhesivo-fibra de carbono (**Figuras 3e** y **3f**).

A nivel microscópico, en las capas de creci-

Tabla 1. Fórmulas y símbolos utilizados.

Fórmula	No.	Referencia
$MOE = \left(\frac{0,4 F_r - 0,1 F_e}{0,4 y_r - 0,1 y_e} \right) \times \left(\frac{L^3}{4 \times b \times h^3} \right)$	(1)	Babiak <i>et al.</i> , (2018)
$MOR = 1,5 \times \left(\frac{F_r \times L}{b \times h^2} \right)$	(2)	Sikora <i>et al.</i> , (2019)
$K_{ductilidad} = \frac{y_r}{y_e}$	(3)	Ottenhaus <i>et al.</i> , (2021)
$K_{flexibilidad} = h \div \left(\frac{L^2}{12 + y_r} \right)$	(4)	Gaff <i>et al.</i> , (2016)

Símbolo	Definición	Unidades
MOE	= Módulo de elasticidad	N m^{-2}
MOR	= Módulo de ruptura	N m^{-2}
$K_{ductilidad}$	= Índice de ductilidad	m m^{-1}
$K_{flexibilidad}$	= Índice de flexibilidad	m m^{-1}
F	= Fuerza	N
F_r	= Fuerza a la ruptura	N
F_e	= Fuerza en el límite elástico	N
y	= Deformación	m
y_r	= Deformación a la ruptura	m
y_e	= Deformación en el límite elástico	m
L	= Distancia entre apoyos	m
b	= Base de la probeta (ancho)	m
h	= Altura de la probeta (espesor)	m

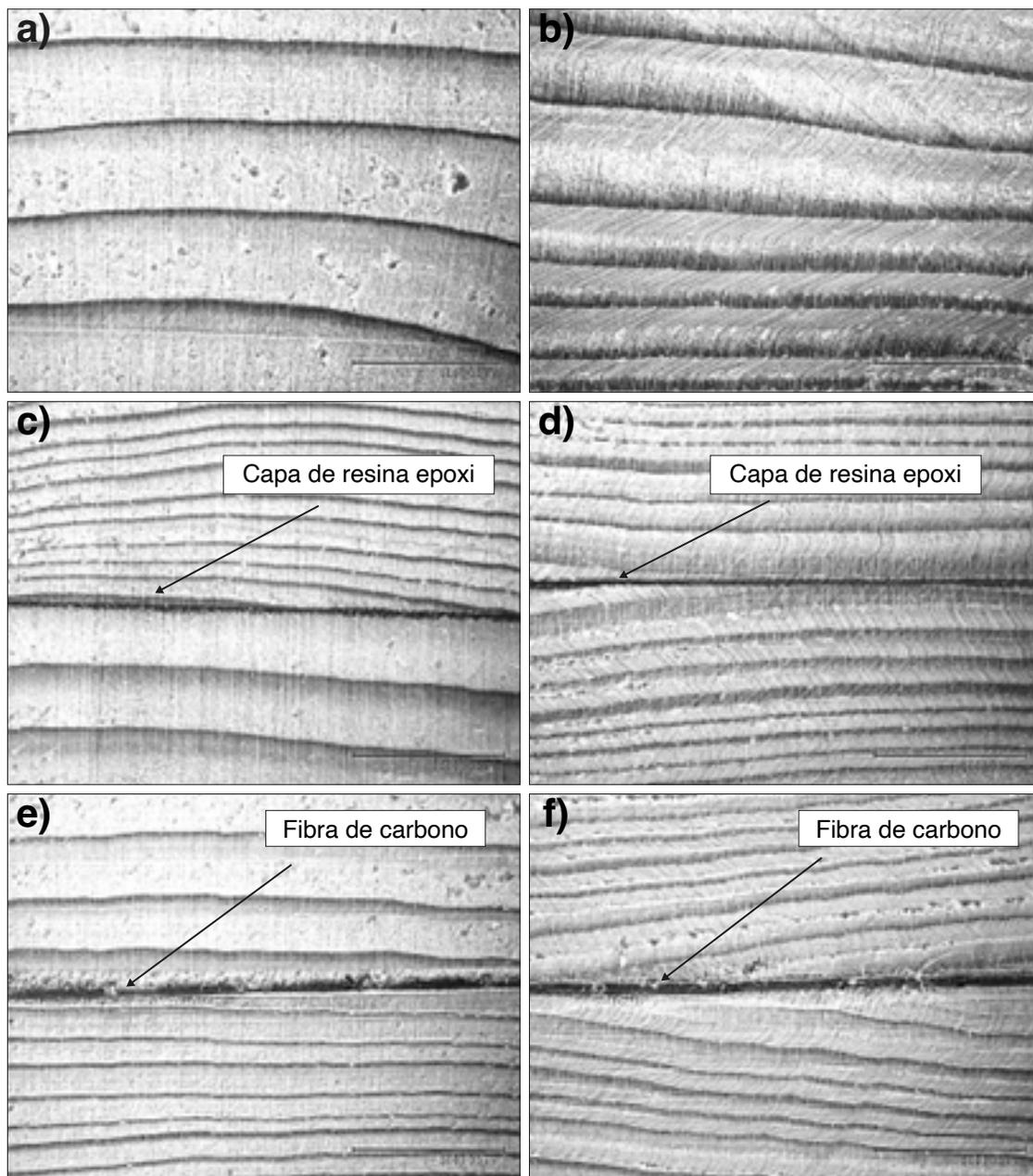


Figura 3. Fotografías macroscópicas de secciones transversales de las probetas. a) Madera sólida; b) Madera densificada; c) Madera laminada; d) Madera densificada y laminada; e) Madera laminada y reforzada; f) Madera densificada laminada y reforzada.

miento de la madera de *C. japonica* se observa una estructura heterogénea con diferentes diámetros, espesores, formas y acomodo de las células (**Figura 4a**). Una vez que la madera es densificada, su aspecto es más homogéneo (**Figura 4b**). Sin embargo, se observan irregularidades en la estructura celular y una penetración discontinua de la resina epoxi en el plano radial-tangencial (**Figura 4c**). En el mismo sentido, se distinguen alteraciones y fisuras en el entorno de las capas madera-adhesivo-fibra de carbono (**Figura 4d**).

Densidad

La densidad de la madera de *C. japonica* fue de 341 kg m^{-3} para la madera sólida y 485 kg m^{-3} para la madera densificada y laminada (**Tabla 2**). La densidad de la madera sólida, laminada y/o reforzada no varía de manera significativa entre las direcciones radial y tangencial ($-3\% < \rho_{\text{CH}} < +2\%$); con excepción de la madera laminada y reforzada en la cual se observa un incremento de $+6\%$ (**Tabla 3**). Cuando se densifica la madera y se incorpora en madera laminada y/o reforzada, la densidad

aumenta ($+32\% < \rho_{CH} < +46$) si se compara con la de la madera sólida no densificada.

Estos resultados se interpretan con los siguientes argumentos: las proporciones de tejido de madera temprana y tardía que conforman una capa de crecimiento de la madera de *C. japonica* se distinguen por las diferentes formas y espesores de las paredes y lúmenes celulares (**Figura 4a**). En la madera densificada, las cavidades celulares se reducen de tal forma que la masa de la pared celular aumenta en relación con el volumen, dando como resultado un material con una estructura más compacta y homogénea, pero ocasionando que la organización original de las células se distorsione (**Figura 4b**). La incorporación de la masa de la resina epoxi aumenta la masa por unidad de volumen, pero en una proporción menor a la del efecto del densificado de la madera sólida (**Figura 4c**). El tejido de fibra de carbono (**Figura 4d**) incrementa poco la proporción de la masa, por lo que no se distingue un aumento significativo de la densidad entre la madera laminada con resina y con fibra de carbono.

Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad de la madera de *C. japonica* varía entre 5501 MN m^{-2} para la madera sólida y 13564 MN m^{-2} para la madera densificada laminada y reforzada (**Tabla 2**). Comparativamente con la madera sólida, la madera laminada, densificada y/o reforzada, incrementan su módulo de elasticidad.

El módulo de elasticidad tangencial es 3% mayor que el módulo radial (**Tabla 3**). En la madera densificada, ya sea laminada densificada y/o reforzada, el incremento del módulo tangencial va desde +27% en la madera laminada, hasta +61% en la madera densificada y laminada (**Tabla 3**). Estos resultados son similares a los reportados por Kubojima *et al.* (2004) para madera de *C. japonica*, quienes utilizaron tasas de densificación de 33% y 67%. En el mismo contexto, los resultados reportados por Laskowska *et al.* (2021) confirman esta tendencia, pero estos autores confunden la cara radial, es decir, el plano R-L, con la dirección (tangencial) en la que la fuerza de flexión se aplica respecto a los anillos de crecimiento.

El módulo de elasticidad de las probetas ela-

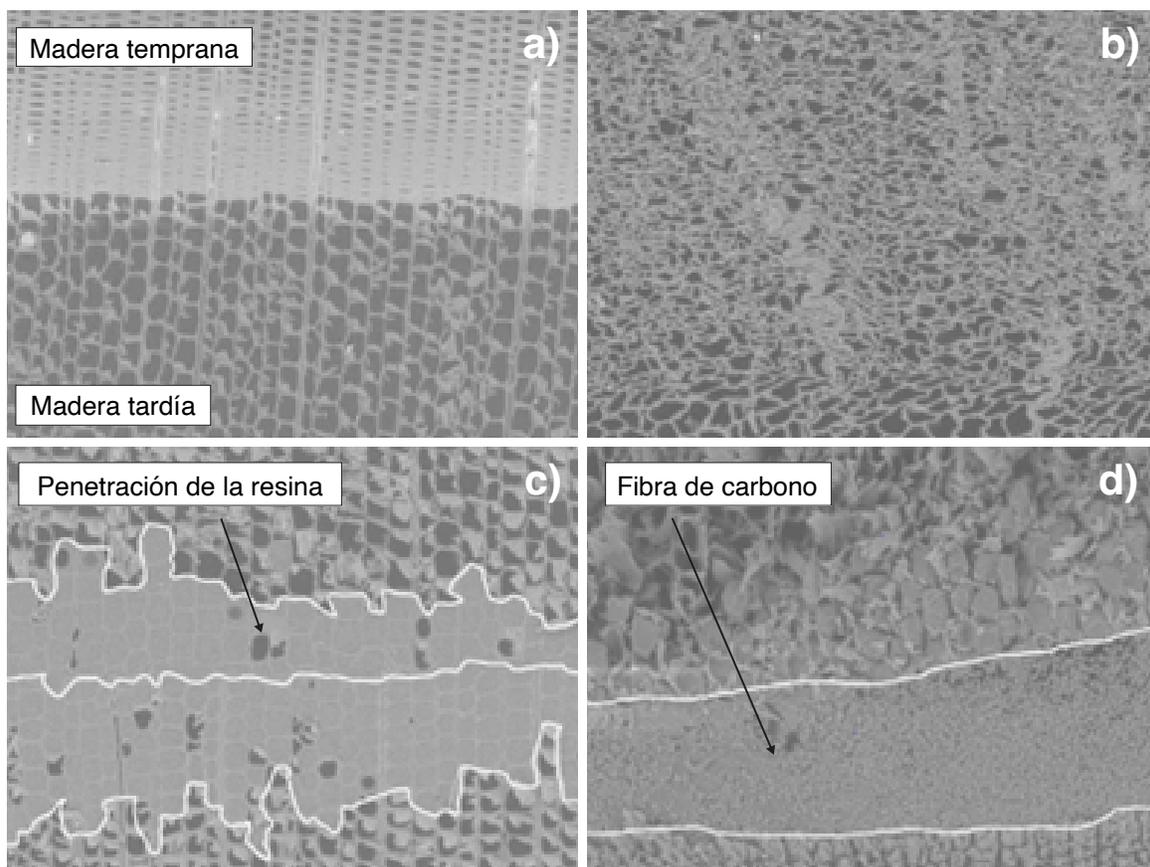


Figura 4. Micrografías de la sección transversal (plano radial-tangencial) de la madera de *Cryptomeria japonica* (Amplificación $\times 200$). a) Capa de crecimiento, b) Madera densificada, c) Resina epoxy, d) Fibra de carbono.

Tabla 2. Contenido de humedad, densidad e indicadores de flexibilidad.

	CH	ρ_{CH}	MOE	MOR	$K_{ductilidad}$	$K_{flexibilidad}$
	(%)	($kg\ m^{-3}$)	($MN\ m^{-2}$)	($MN\ m^{-2}$)	($m\ m^{-1}$)	($m\ m^{-1}$)
Madera sólida (S)						
R	12	341	5501	49,08	4,88	0,040
T	12	347	5658	47,26	4,59	0,033
Madera laminada (L)						
R	11	346	9028	66,77	5,63	0,034
T	11	343	11444	83,62	4,38	0,027
Madera laminada y reforzada(L+F)						
R	11	337	8233	66,76	7,02	0,034
T	11	356	11429	78,96	5,39	0,031
Madera densificada (D)						
R	13	497	7219	59,89	4,41	0,032
T	13	481	9719	89,38	3,72	0,030
Madera densificada y laminada (DL)						
R	9	479	8357	84,18	3,65	0,032
T	9	485	13426	101,82	3,33	0,021
Madera densificada laminada y reforzada (DL+F)						
R	10	466	9295	97,01	4,46	0,040
T	10	471	13564	101,99	3,47	0,022

CH = Contenido de humedad; ρ_{CH} = Densidad; MOE = Módulo de elasticidad; MOR = Módulo de ruptura; $K_{ductilidad}$ = Índice de ductilidad; $K_{flexibilidad}$ = Índice de flexibilidad; R = Dirección radial; T = Dirección tangencial.

boradas con madera densificada se incrementa con respecto a las probetas de madera no densificada. Este resultado se observa igualmente para probetas de madera laminada y/o reforzada (**Tabla 3**). Caso excepcional es la madera densificada laminada donde se observa una disminución del módulo de elasticidad en la dirección tangencial con respecto a la dirección radial. Este incremento en el módulo de elasticidad de la madera se puede explicar admitiendo dos paradigmas vigentes en ciencias de la madera: por una parte, que su resistencia mecánica aumenta a medida que la densidad se incrementa (Prihatmaji *et al.*, 2012; Almeida *et al.*, 2022) y, por otra parte, que el módulo de elasticidad en flexión tangencial es mayor que el radial (Kim *et al.*, 2022; Mascia *et al.*, 2022).

En el caso de la madera sólida, las diferentes capas de crecimiento se alinean paralelamente, lo que permite modelar la madera como un material multicapas a la escala anatómica de los tejidos de crecimiento anuales de un árbol. Cuando la fuerza

Tabla 3. Diferencias en por ciento de los indicadores de flexibilidad entre direcciones y configuraciones.

Diferencias entre las direcciones tangencial y radial (T/R)						
	ρ_{CH}	MOE	MOR	$K_{ductilidad}$	$K_{flexibilidad}$	
	(kg/m^3)	(MN/m^2)	(MN/m^2)	(m/m^{-1})	(m/m^{-1})	
S	+2	+3	-4	-6	-17	
L	-1	+27	+25	-22	-21	
L+F	+6	+39	+18	-23	-11	
D	-3	+35	+49	-16	-8	
DL	+1	+61	+21	-9	-34	
DL+F	+1	+46	+5	-22	-44	
Diferencias entre la madera densificada y no densificada						
	D/S		DL/L		DL+F/L+F	
	R	T	R	+T	R	T
ρ_{CH}	+46	+39	+38	+41	+38	+32
MOE	+31	+72	-7	+17	+13	+19
MOR	+22	+89	+26	+22	+45	+29
$K_{ductilidad}$	-10	-19	-35	-24	-37	-36
$K_{flexibilidad}$	-18	-9	-5	-21	+17	-27

ρ_{CH} = Densidad; MOE = Módulo de elasticidad; MOR = Módulo de ruptura; $K_{ductilidad}$ = Índice de ductilidad; $K_{flexibilidad}$ = Índice de flexibilidad; R = Dirección radial; T = Dirección tangencial; 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.

es aplicada en la dirección radial de la probeta, esta reacciona como una placa conformada por dos componentes de madera. El efecto de este acomodo relativo de las capas de crecimiento de la madera, respecto a la dirección de la carga resulta en una diferencia de módulos de elasticidad y/o de ruptura. En cambio, el efecto de la presencia de la placa rígida de resina epoxi y/o de fibra de carbono puede explicar que los módulos de elasticidad y de ruptura de la madera laminada, densificada y/o reforzada, correspondientes a la dirección tangencial sean mayores en comparación con los de la dirección radial.

En el caso de la madera laminada, tanto sólida como densificada, esta configuración natural de multicapas se interrumpe y se reconstruye con la ayuda de una capa de resina epoxi, la cual funciona como adherente y endurecedor, situado en entorno del eje neutro de la probeta. A su vez, el tejido de fibra de carbono, en la capa intermedia actúa como refuerzo y/o componente estabilizador entre las superficies de la madera adheridas con resina epoxi.

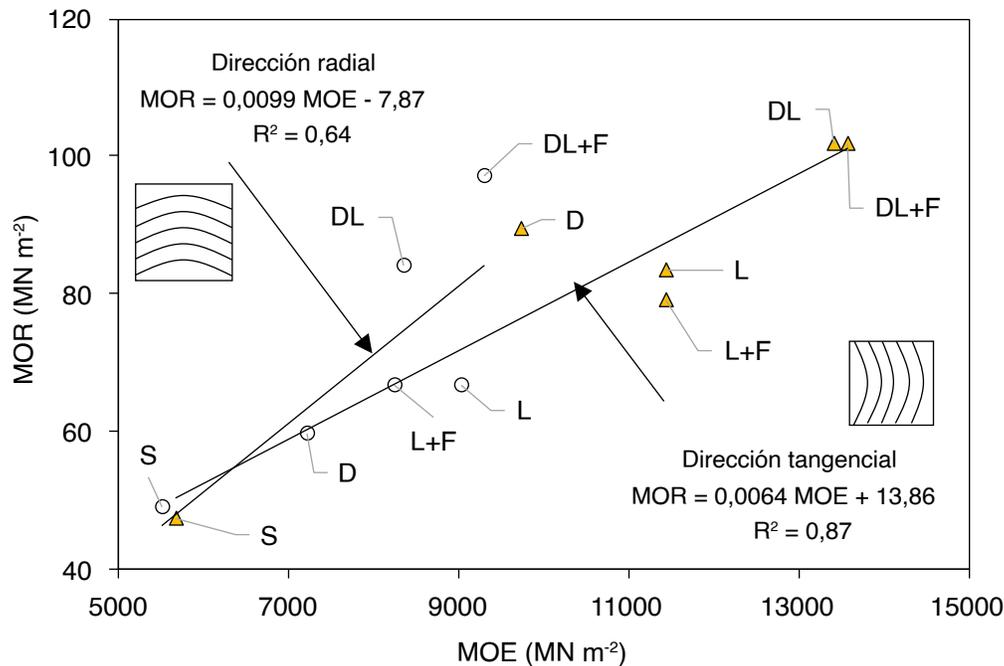


Figura 5. Correlación de los módulos de ruptura (MOR) en función de los módulos de elasticidad (MOE). S = Madera sólida; L = Madera laminada; L+F = Madera laminada y reforzada; D = Madera densificada; DL = Madera densificada y laminada; DL+F = Madera densificada laminada y reforzada; R = Dirección radial; T = Dirección tangencial.

Módulo de ruptura

El módulo de ruptura de la madera de *C. japonica* varía entre $47,26 \text{ MN/m}^2$ para la madera sólida y $101,99 \text{ MN m}^{-2}$ para la madera densificada laminada y reforzada (**Tabla 2**). De manera análoga al módulo de elasticidad, la madera laminada, así como la densificada y/o reforzada incrementan su módulo de ruptura comparativamente con la madera sólida. Para todas las configuraciones, el módulo de elasticidad tangencial es en promedio 24% mayor que el módulo radial, sin considerar un decremento de -4% que se observa para la madera sólida (**Tabla 3**). Para la dirección radial se observa una correlación media entre el módulo de ruptura y el de elasticidad, y una correlación fuerte para la dirección tangencial (**Figura 5**).

Índice de ductilidad

El índice de ductilidad tangencial es menor respecto al radial. Las disminuciones van desde -6% para la madera sólida sin densificar, hasta -23% para la madera laminada y reforzada (**Tabla 3**). Este resultado está relacionado con el acomodo relativo de las capas de crecimiento de la madera, respecto a la dirección de la carga, observado en los resultados del módulo de elasticidad (**Tabla 3**) y reportados por Karaman *et al.* (2021) en la

caracterización de madera laminada de *Pinus nigra* adherida con resina epoxi y reforzada con tejido de fibra de aramida. En el mismo tenor, el índice de ductilidad de la madera densificada es menor que el de la madera sin densificar y el índice de ductilidad en flexión disminuye con el densificado (**Tabla 3**).

El índice de ductilidad en flexión ($K_{\text{ductilidad}}$, Fórmula 3) depende de la deformación a la ruptura y la deformación en el límite elástico. La deformación en el límite elástico es medida bajo el supuesto de la no existencia de deformaciones locales en las superficies de la probeta en las zonas de contacto de los apoyos y la herramienta con que se aplica la fuerza. Este supuesto no es necesariamente cierto, particularmente en el dominio plástico, y se intensifica en el momento crítico cuando es máxima la fuerza aplicada, es decir, la fuerza a la ruptura (F_r). En consecuencia, el indicador $D_{\text{FLEXIÓN}}$ está subestimado, particularmente para la madera sólida en sus dos orientaciones. Una vez que la madera fue laminada, densificada y/o reforzada este fenómeno es diferente.

Si se toma como referencia la madera sólida, la madera laminada disminuye su $K_{\text{ductilidad}}$, en cambio, la ductilidad radial de la madera laminada y reforzada en ambas direcciones aumenta. Este resultado coincide con los de Novosel *et al.* (2021) quienes reportan la

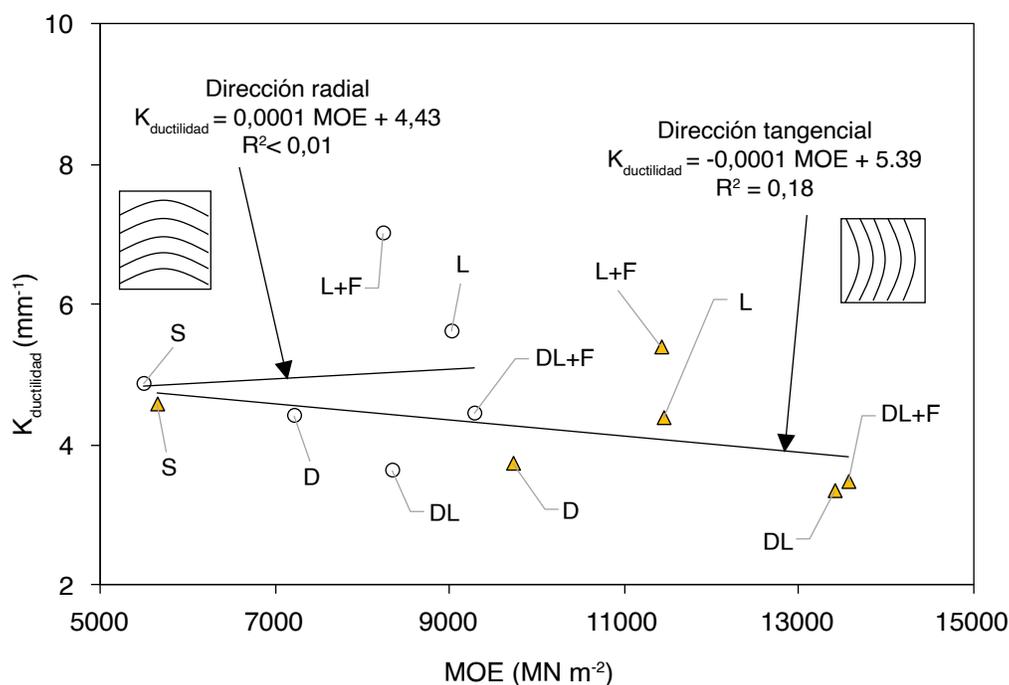


Figura 6. Correlación de los índices de ductilidad ($K_{\text{ductilidad}}$) en función de los módulos de elasticidad (MOE). S = Madera sólida; L = Madera laminada; L+F = Madera laminada y reforzada; D = Madera densificada; DL = Madera densificada y laminada; DL+F = Madera densificada laminada y reforzada; R = Dirección radial; T = Dirección tangencial.

misma tendencia para vigas laminadas de *Quercus Robur*, adheridas con resina epoxi y reforzadas con tejido de fibra de carbono.

El índice de ductilidad no depende del módulo de elasticidad (**Figura 6**). En la dirección radial, se advierte una dispersión entre resultados para las seis configuraciones a medida que el módulo de elasticidad aumenta. Así mismo, para la dirección tangencial se observa una importante dispersión entre la madera sólida y densificada, pero una proximidad entre los resultados de la madera laminada y reforzada.

Índice de flexibilidad

Los índices de flexibilidad ($K_{\text{flexibilidad}}$) se calculan en relación con la base (espesor) de la probeta, la distancia entre apoyos (L) y la deformación a la ruptura (y_r en Fórmula 4). Este indicador depende de la deflexión elástica y es susceptible al método y al contenido de humedad (Babiak *et al.*, 2018). En el caso de la madera sólida, las capas de las probetas solicitadas en dirección radial trabajan en conjunto como un material multi-placas, unidas naturalmente y como un material continuo (a la escala de observación de la presente investigación). Una vez laminada la madera, el sistema es formado

por dos componentes adheridos por una capa de resina epoxi y/o reforzada con tejido de fibra de carbono (**Figura 1**). Este estado une de manera artificial el sistema viga-probeta y se crea una discontinuidad en el tejido leñoso. No obstante, la resina epoxi y la fibra de carbono incrementan la magnitud de sus parámetros de elasticidad (MOE, **Tabla 2**) y de ruptura (MOR, **Tabla 2**) respecto a los correspondientes a la madera sólida, pero no necesariamente las de sus indicadores de flexibilidad ($K_{\text{ductilidad}}$, **Figura 6** y $K_{\text{flexibilidad}}$, **Figura 7**). Para el caso de la madera densificada, no solo su relación masa volumen aumenta, sino su estructura celular es más compacta y, para un coeficiente de densificado del 50%, el deterioro físico de la estructura celular es mínimo (**Figura 4**).

Para la madera laminada en la dirección radial, la capa de adhesivo, una vez endurecida, actúa como una lámina con propiedades de rigidez propias, pero combinada con el conjunto madera-capa de resina epoxi da como resultado una estructura artificial con una resistencia mecánica mayor a la de la madera de *C. japonica*. En cambio, las probetas tangenciales trabajan como placas acomodadas horizontalmente, lo cual permite que la madera se flexione con más facilidad y en mayor proporción.

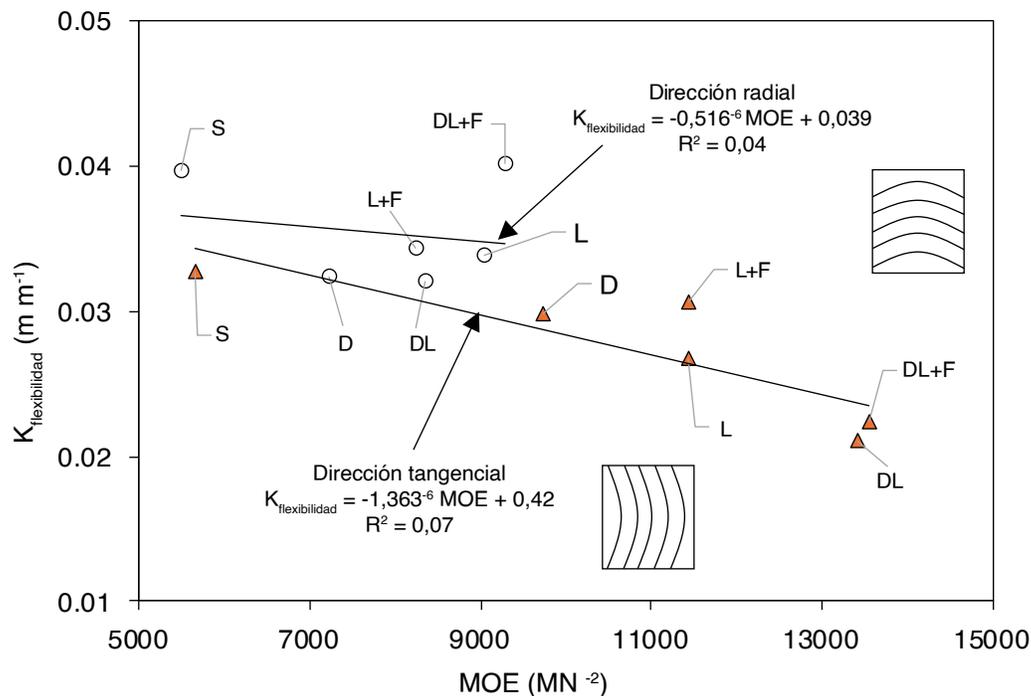


Figura 7. Correlación de los índices de flexibilidad ($K_{\text{flexibilidad}}$) en función de los módulos de elasticidad (MOE). S = Madera sólida; L = Madera laminada; L+F = Madera laminada y reforzada; D = Madera densificada; DL = Madera densificada y laminada; DL+F = Madera densificada laminada y reforzada; R = Dirección radial; T = Dirección tangencial.

La configuración y/o acomodo del plano de la capa adhesiva, ya sea solo de resina epoxi y/o tejido de fibra de carbono, es más flexible en la dirección radial, es decir, perpendicular a la dirección de la fuerza, comparativamente al acomodo del mismo plano, pero en la dirección tangencial, es decir, cuando el plano de la capa adhesiva es paralelo a la dirección de la fuerza.

Comparativamente con la madera sólida, la madera laminada disminuye su índice de flexibilidad ($K_{\text{flexibilidad}}$, Fórmula 4). Este indicador representa la relación del espesor (h) de la probeta dividido por el radio mínimo de flexión (Gaff *et al.*, 2016). Este concepto es derivado de las relaciones geométricas de la flexión y se calcula con la deformación a la ruptura (y_r) medida en medio de la portada ($L/2$) de la catenaria (Cao *et al.*, 2023). La deformación a la ruptura (F_r) incluye el desplazamiento ocasionado por el esfuerzo cortante y en condiciones reales de las pruebas de flexión, contiene también el desplazamiento de la probeta ocasionado por las deformaciones locales en los apoyos y/o en la herramienta de aplicación de la fuerza, de tal forma que la deformación a la ruptura es mayor a la deformación teórica en condiciones ideales de las

pruebas de flexión. En consecuencia, el índice de flexibilidad es subestimado.

El índice de flexibilidad no depende del módulo de elasticidad (**Figura 7**). Sin embargo, se observa una ligera tendencia en su disminución a medida que el módulo de elasticidad aumenta. En el mismo contexto, y derivado del análisis de los resultados de todas las probetas, no se observó una correlación importante entre los índices de ductilidad y de flexibilidad ($K_{\text{ductilidad}} = 0,0028 K_{\text{flexibilidad}} + 0,018$, $R^2 = 0,27$). Este resultado sugiere que estos dos indicadores de flexibilidad son independientes del tipo de configuración de las probetas.

Conclusiones

Se determinó la densidad, los módulos de elasticidad y de ruptura, así como los índices de ductilidad y de flexibilidad en probetas de madera de *C. japonica*. Estos parámetros se estudiaron en seis configuraciones: madera sólida, madera densificada, madera laminada, madera densificada y laminada, madera laminada y reforzada, así como madera densificada laminada y reforzada.

El densificado laminado y reforzado de la made-

ra de *C. japonica* incrementa sus módulos de elasticidad y de ruptura. En contraste, estas modificaciones disminuyen sus índices de ductilidad y de flexibilidad. En el mismo sentido, los parámetros determinados en la dirección tangencial son mayores que los determinados en la dirección radial.

Agradecimientos

Esta investigación fue patrocinada por el Instituto de Tecnología de la Madera de la Universidad Prefectoral 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 Ryuto Kumamoto, alumno de la Escuela de Graduados en Ciencias de Biorecursos, de la Universidad Prefectoral de Akita, en Japón, por su participación en los trabajos de microscopía.

Referencias

- Almeida ADS, Criscuolo G, Arroyo FN, Aquino VBM, Silva DAL, Molina JC, Chahud E, Branco LAMN, Christoforo AL, Lahr FAR (2022). Estimation of compression and shrinkage properties of Brazilian tropical timber through porosimetry analysis by mercury intrusion. *BioResources* 17(1): 519-526. doi: <https://doi.org/10.15376/biores.17.1.519-526>
- Babiak M, Gaff M, Sikora A, Hysek Š (2018). Modulus of elasticity in three- and four-point bending of wood. *Composite Structures* 204: 454-465. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.07.113>
- Bal BC (2016). Some technological properties of laminated veneer lumber produced with fast-growing poplar and eucalyptus. *Maderas. Ciencia y Tecnología* 18(3): 413-424. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2016005000037>
- Bao M, Huang X, Jiang M, Yu W, Yu Y (2017). Effect of thermo-hydro-mechanical densification on microstructure and properties of poplar wood (*Populus tomentosa*). *Journal of Wood Science* 63: 591-605. <https://doi.org/10.1007/s10086-017-1661-0>
- Cao AS, Grönquist P, Frangi A (2023). Catenary action in strip-reinforced wood and timber beams. *Construction and Building Materials* 385: 131422. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131422>
- Foraboschi P (2009). Analytical solution of two-layer beam taking into account nonlinear interlayer slip. *ASCE Journal of Engineering Mechanics* 135(10): 1129-1146. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0000043](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000043)
- Frihart CR (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>
- Gaff M, Gašparik M, Borůvka V, Haviarová E (2015). Stress simulation in layered wood-based materials under mechanical loading. *Materials and Design* 87: 1065-1071. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2015.08.128>
- Gaff M, Vokatý V, Babiak M, Bal BC (2016). Coefficient of wood bendability as a function of selected factors. *Construction and Building Materials* 126: 632-640. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.085>
- 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>
- International Organization for Standardization (2012). ISO 3129:2012: Wood - Sampling methods and general requirements for physical and mechanical testing of small clear wood specimens. Geneva: International Organization for Standardization. 9 p. <https://www.iso.org/standard/52489.html>
- International Organization for Standardization (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. Geneva: International Organization for Standardization. 4 p. http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=60063
- International Organization for Standardization (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. Geneva: International Organization for Standardization. 5 p. 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.fwjafe.2019.12.61.2.4>
- Kandler G, Lukacevic M, Zechmeister C, Wolff S, Füssl J (2018). Stochastic engineering framework for timber structural elements and its application to glued laminated timber beams. *Construction and Building Materials* 190: 573-592. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.129>
- Karaman A, Yildirim MN, Tor O (2021). Bending characteristics of laminated wood composites constructed with black pine wood and aramid fiber reinforced fabric. *Wood Research* 66(2): 309-320. <https://doi.org/10.37763/wr.1336-4561/66.2.309320>
- Kim SH, Purusatama BD, Kim JH, Lee SH, Kim NHA (2022). Comparative study of the bending properties of Dahurian larch and Japanese larch grown in Korea. *Forests* 13: 1074. <https://doi.org/10.3390/f13071074>
- Kliger IR, Haghani R, Brunner M, Harte AM, Schober K (2016). Wood-based beams strengthened with FRP laminates: improved performance with pre-stressed systems. *European Journal of Wood and Wood Products* 74: 319-330. <https://doi.org/10.1007/s00107-015-0970-5>
- Kretschmann D, Hernandez R (2006). "Grading timber and glued structural members", Walker JCF, *Primary Wood Processing. Principles and Practice*: Springer Dordrecht, pp. 339-390. eBook ISBN: 978-1-4020-4393-2. <https://doi.org/10.1007/1-4020-4393-7>
- Kubojima Y, Ohtani T, Yoshihara H (2004). Effect of shear deflections on bending properties compressed wood. *Wood and Fiber Science* 36(2): 201-215. <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/1316/1316>
- Laskowska A, Majewska K, Kozakiewicz P, Mamiński M, Bryk G (2021). Case study of anatomy, physical and mechanical properties of the sapwood and heartwood of random tree *Platyclusus orientalis* (L.) franco from South-Eastern Poland. *Forests* 12: 925. <https://doi.org/10.3390/f12070925>
- Manalo AC, Aravinthan T, Karunasena W (2010). Flexural behaviour of glue-laminated fibre composite sandwich beams. *Composite Structures* 92(11): 2703-2711. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2010.03.006>
- Mascia NT, Kretschmann DE, Vilela R (2022). Evaluation of wood modulus of rupture and modulus of elasticity in the radial and tangential directions in bending and reliability analysis. *European Journal of Wood and Wood Products* 80: 597-610. <https://doi.org/10.1007/s00107-022-01788-5>
- Namari S, Drosky L, Pudlitz B, Haller P, Sotayo A, Bradley D, Mehra S, O'Ceallaigh C, Harte AM, El-Houjeyri I, Oudjene M, Guan Z (2021). Mechanical properties of compressed wood. *Construction and Building Materials* 301: 124269. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124269>
- Novosel A, Sedlar T, Čizmar D, Turkulin H, Živković V (2021). Structural reinforcement of bi-directional oak-wood lamination by carbon fibre implants. *Construction and Building Materials* 287: 123073. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123073>
- Ottenhaus, L-M., Jockwer R, van Drimmelen D, Crews K (2021). Designing timber connections for ductility - A review and discussion. *Construction and Building Materials* 304: 124621. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124621>
- Prihatmaji YP, Kitamori A, Murakami S, Komatsu K (2012). Study on mechanical properties of tropical timber hardwood species: promoting javanese inferior timbers for traditional wooden houses. *Wood Research Journal* 3(1): 44-54. <https://doi.org/10.1234/wrj.v3i1.52>
- Rescalvo FJ, Duriot R, Pot G, Gallego A, Denaud L (2020). Enhancement of bending properties of Douglas-fir and poplar laminate veneer lumber (LVL) beams with carbon and basalt fibers reinforcement. *Construction and Building Materials* 263: 120185. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120185>
- Saad K, Lengyel A (2022). Strengthening timber structural members with CFRP and GFRP: A state-of-the-art review. *Polymers* 14: 2381. <https://doi.org/10.3390/polym14122381>
- Schober KU, Harte AM, Kliger R, Jockwer R, Xu Q, Chen, J-F (2015). FRP reinforcement of timber structures. *Construction and Building Materials* 97: 106-118. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.020>
- Shi J, Peng J, Huang Q, Cai L, Shi Q (2020). Fabrication of densified wood via synergy of chemical pretreatment, hot-pressing and post mechanical fixation. *Journal of Wood Science* 66: 5. <https://doi.org/10.1186/s10086-020-1853-x>
- Sikora A, Gaffová Z, Rajnoha R, Šatanová A, Kminiak R (2017). Deflection of densified beech and aspen woods as a function of selected factors. *BioResources* 12(2): 3192-3210. <https://doi.org/10.15376/biores.12.2.3192-3210>
- Sikora A, Svoboda T, Záborský V, Gaffová Z (2019). Effect of selected factors on the bending deflection at the limit of proportionality and at the modulus of rupture in laminated veneer lumber. *Forest* 10(5): 401. <https://doi.org/10.3390/f10050401>
- Śliwa-Wieczorek K, Ostrowski KA, Jaskowska-Lemańska

- J, Karolak A (2021). The influence of CFRP sheets on the load-bearing capacity of the glued laminated timber beams under bending test. *Materials* 14(14): 4019. <https://doi.org/10.3390/ma14144019>
- Sotomayor Castellanos JR (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
- Svoboda T, Ruman D, Gaff M, Gasparik M, Miftieva E, Dundek L (2015). Bending characteristics of multilayered soft and hardwood materials. *BioResources* 10(4): 8461-8473. <https://doi.org/10.15376/biores.10.4.8461-8473>
- 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: 470. <https://doi.org/10.3390/f10060470>
- Wang B, Bachtiar EV, Yan L, Kasal B, Fiore V (2019). Flax, basalt, e-glass frp and their hybrid frp strengthened wood beams: An experimental study. *Polymers* 11: 1255. <https://doi.org/10.3390/polym11081255>
- Wdowiak-Postulak A, Brol J (2020). Ductility of the tensile zone in bent wooden beams strengthened with CFRP materials. *Materials* 13: 5451. <https://doi.org/10.3390/ma13235451>
- Yusof A, Rahman AB (2017). Flexural strengthening of timber beams using carbon fibre reinforced polymer. *International Journal of Applied Engineering Research* 12(3): 348-358. https://www.ripublication.com/ijaer17/ijaerv12v3_12.pdf