

Comportamiento dinámico en vibraciones transversales de madera densificada, laminada y reforzada con fibra de carbono

Dynamic behavior in transverse vibrations of densified, laminated and carbon fiber-reinforced wood

1* Javier Ramón Sotomayor-Castellanos, 2Koji Adachi

¹Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Avenida Francisco J. Múgica S/N, Ciudad Universitaria, C. P. 58030, Morelia, Michoacán, México. Correo electrónico: javier.sotomayor@umich.mx ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1527-8801>

²Institute of Wood Technology, Universidad Prefectoral de Akita, 11-1 Kaeizaka, Noshiro, Akita 016-0876, Japón. Correo electrónico: kadachi@iwt.akita-pu.ac.jp ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9962-5750>

*Autor de correspondencia.

Recibido: 5 de abril del 2025

Aceptado: 8 de septiembre del 2025

Publicado: 30 de septiembre del 2025

<https://doi.org/10.33064/iycuaa2025968288>
e8288

RESUMEN

La modificación de la madera con tratamientos de laminado, densificado y reforzado con fibra de carbono se orienta a la mejora de sus propiedades tecnológicas y a la optimización de sus aplicaciones industriales. El objetivo de la investigación fue determinar las densidades y los módulos dinámicos de madera sólida, laminada y reforzada de *Cryptomeria japonica* (sugi). Se realizaron pruebas de vibraciones transversales empleando 36 probetas de pequeñas dimensiones. Los tratamientos de laminado, densificado y reforzado con fibra de carbono incrementan la densidad y el módulo dinámico de la madera sólida. Esta mejora tecnológica se explica por el efecto del densificado, de la resina epoxi como adhesivo y por la incorporación de fibra de carbono como refuerzo. Las magnitudes siguen las tendencias estadísticas de las de maderas reportadas en la bibliografía.

Palabras clave: *Cryptomeria japonica*; densidad de la madera; modificación de la madera; vibraciones; módulo dinámico; sugi.

ABSTRACT

The modification of wood with lamination, densification, and carbon fiber reinforcement treatments is aimed at improving its technological properties and optimizing its industrial applications. The objective of the research was to determine the densities and dynamic modules of solid, laminated, and reinforced wood of *Cryptomeria japonica* (sugi). Transverse vibration tests were performed using 36 small test specimens. The treatments of laminating, densifying, and reinforcing with carbon fiber increase the density and dynamic modulus of solid wood. This technological improvement is explained by the effect of densification, the

epoxy resin as an adhesive, and the incorporation of carbon fiber as reinforcement. The magnitudes follow the statistical trends of those of woods reported in the literature.

Keywords: *Cryptomeria japonica*; wood density; wood modification; vibrations; dynamic modulus; sugi.

INTRODUCCIÓN

El densificado de la madera es una técnica que incrementa su densidad y como consecuencia aumenta las propiedades de resistencia mecánica del material (Kandler, Lukacevic, Zechmeister, Wolff, & Füssl, 2018). Por su parte, el laminado de la madera se concibe principalmente como una tecnología para aumentar las dimensiones de elementos estructurales. De tal forma que ingenieros y arquitectos pueden calcular y diseñar proyectos con geometrías y aspectos que diversifican el uso de la madera aserrada transformándola en material de ingeniería y de arquitectura (Kliger, Haghani, Brunner, Harte, & Schober, 2016). En el mismo sentido, la incorporación de tejido de fibra de carbono en la madera tiene como objetivo principal reforzar su resistencia mecánica (Śliwa-Wieczorek, Ostrowski, Jaskowska-Lemańska, & Karolak, 2021).

Las investigaciones mencionadas utilizan muestras de dimensiones reducidas; no obstante, otras investigaciones se centran en propiedades físico-mecánicas mediante el acondicionamiento de configuraciones experimentales específicas para madera laminada (Bal, 2016; Sikora, Gaffová, Rajnoha, Šatanová, & Kminiak, 2017; Sikora, Svoboda, Záborský, & Gaffová, 2019) y para madera reforzada (Svoboda, Sikora, Záborský, & Gaffová, 2019; Rescalvo, Duriot, Pot, Gallego, & Denaud, 2020; Novosel, Sedlar, Čizmar, Turkulin, & Živković, 2021). Entre otras técnicas de refuerzo, el uso de tejido de fibra de carbono para incrementar los módulos de elasticidad está reportado tanto para madera sólida (Yusof & Rahman, 2017), como para madera laminada (Śliwa-Wieczorek et al. 2021) y para vigas laminadas de grandes dimensiones (Wdowiak-Postulak & Brol, 2020). En este contexto, existe evidencia empírica de que las condiciones de manufactura influyen en el comportamiento mecánico del material resultante y en los usos que se le puedan dar en la industria de la construcción (Svoboda et al., 2019).

En la literatura es notoria la ausencia de estudios integrales sobre el incremento del módulo dinámico de madera laminada, densificada y/o reforzada. La tendencia experimental se orienta hacia investigaciones en las que se comparan las propiedades de la madera aserrada y la madera con algún tipo de modificación. Los hallazgos muestran que, respecto a la madera aserrada, la madera laminada reduce su heterogeneidad estructural (Kandler

et al., 2018); la madera densificada incrementa su resistencia mecánica (Gaff, Vokatý, Babiak, & Bal, 2016); el empleo de resina epoxi consolida las conexiones de la madera laminada (Karaman, Yıldırım, & Tor, 2021); y la incorporación de tejido de fibra de carbono mejora sus propiedades mecánicas (Wang, Bachtiar, Yan, Kasal, & Fiore, 2019). La combinación de las modificaciones de densificado, laminado y reforzado 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 su módulo de elasticidad (Kretschmann & Hernandez, 2006), el cual aumenta a medida que su densidad se incrementa (Niklas & Spatz, 2010; Brémaud et al., 2012; Wegst, 2006). Si se combinan los procesos de laminado, densificado y reforzado, se puede obtener una mejora tecnológica que amplíe el uso racional de la madera. Para evaluar esta hipótesis de trabajo, como objetivo de la investigación, se propone determinar los módulos dinámicos de madera sólida, laminada y reforzada, mediante pruebas de vibraciones transversales de *Cryptomeria japonica* (Thunb. ex L.f.) D. Don (sugi). La madera de sugi es endémica de Japón y es ampliamente empleada en la industria de la edificación y de productos de madera (Hayashi & Miyatake, 2015).

MATERIALES Y MÉTODOS

Se recolectó madera aserrada de sugi en la prefectura de Akita, Japón y se prepararon 36 probetas de 20 mm de ancho por 20 mm de espesor y 320 mm de longitud. La especie fue identificada en el Instituto de Tecnología de la Madera, perteneciente a la Universidad Prefectoral de Akita, Japón. La descripción anatómica de sugi está detallada en Román-Jordán, Esteban, de Palacios, & Fernández (2017) y sus características tecnológicas en Ishiguri, Kasai, Yokota, Iizuka, & Yoshizawa (2005). La madera se acondicionó a temperatura de 20 °C y una humedad relativa del aire de 65% hasta que alcanzó contenidos de humedad en equilibrio de 9 a 12%. Las probetas se elaboraron con láminas de madera de albara, libres de anomalías de crecimiento y de madera de duramen. Se prepararon seis configuraciones. La dirección radial y tangencial se definen respecto a los anillos de crecimiento en el plano radial-tangencial del plano leñoso (Figura 1).

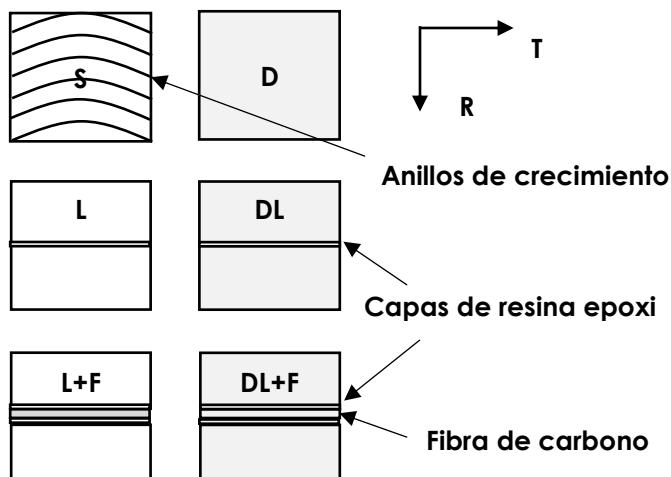


Figura 1. Configuraciones de las probetas. R = Dirección radial; T = Dirección tangencial; S = Madera sólida; L = Madera laminada; L+F = Madera laminada y reforzada; D = Madera densificada; DL = Madera densificada y laminada; DL+F = Madera densificada-laminada y reforzada.

Nota: Elaboración propia con datos de la investigación.

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 dirección radial con una velocidad de prensado de 1 mm/min hasta alcanzar un espesor de 50% de su dimensión original. La presión aplicada osciló entre 30 y 50 MPa. Una vez alcanzado el objetivo de densificado, las placas se mantuvieron en la prensa con temperatura de 120 °C durante 6 horas. Cuando estuvieron formadas las placas, estas se enfriaron a temperatura de 20 °C por 12 horas.

Para fabricar las probetas laminadas, se unieron dos láminas de madera con dos capas de 22 g (200 g/m²) de resina epoxi E200 (Konishi, Japón). La presión de compresión fue de 0,981 MPa, 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 tangencial-longitudinal 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 (ISO, 2014a) y la densidad aparente ISO 13061-2:2014 (ISO, 2014b). Una vez que la madera fue laminada y/o reforzada, las probetas se consideran como un material simétrico conformado por dos componentes homogéneos unidos por una capa rígida de adhesivo y/o tejido de fibra de carbono.

Las pruebas de vibraciones transversales adaptaron el protocolo reportado por Sotomayor-Castellanos & Macedo-Alquicira (2023). Se realizaron 6 repeticiones por configuración. El módulo dinámico se calculó con la Ecuación (1) (Faydi, Brancherieu, Pot, & Collet, 2017):

$$E_{vt} = \frac{4 \pi^2 L^4 f_{vt}^2 \rho_{CH}}{m^4 r^2} \times \left[1 + \frac{r^2}{l_{vt}^2} K \right] \quad (1)$$

Donde: E_{vt} = Módulo dinámico (Pa), L = Longitud de la probeta (m), l_{vt} = Distancia entre apoyos (m), f_{vt} = Frecuencia natural (Hz), ρ_{CH} = Densidad (kg/m^3), m , K = Constantes adimensionales (12,65, 49,48), r = Radio de giro de la sección transversal de la probeta (m).

RESULTADOS

Los tratamientos de densificado, laminado y reforzado modifican la estructura anatómica original y heterogénea de la madera sólida de sugi (Figura 2a) (Ishiguri et al., 2005). Si se reestructura la madera uniendo con resina epoxi dos elementos, se obtiene un material laminado (Figura 2b). Al agregar a este laminado una capa de tejido de fibra de carbono entre dos elementos de madera densificada se integran los procesos de laminado, densificado y reforzado para crear un multimaterial (Figura 2c) (Sikora et al., 2017; Schober et al., 2015).

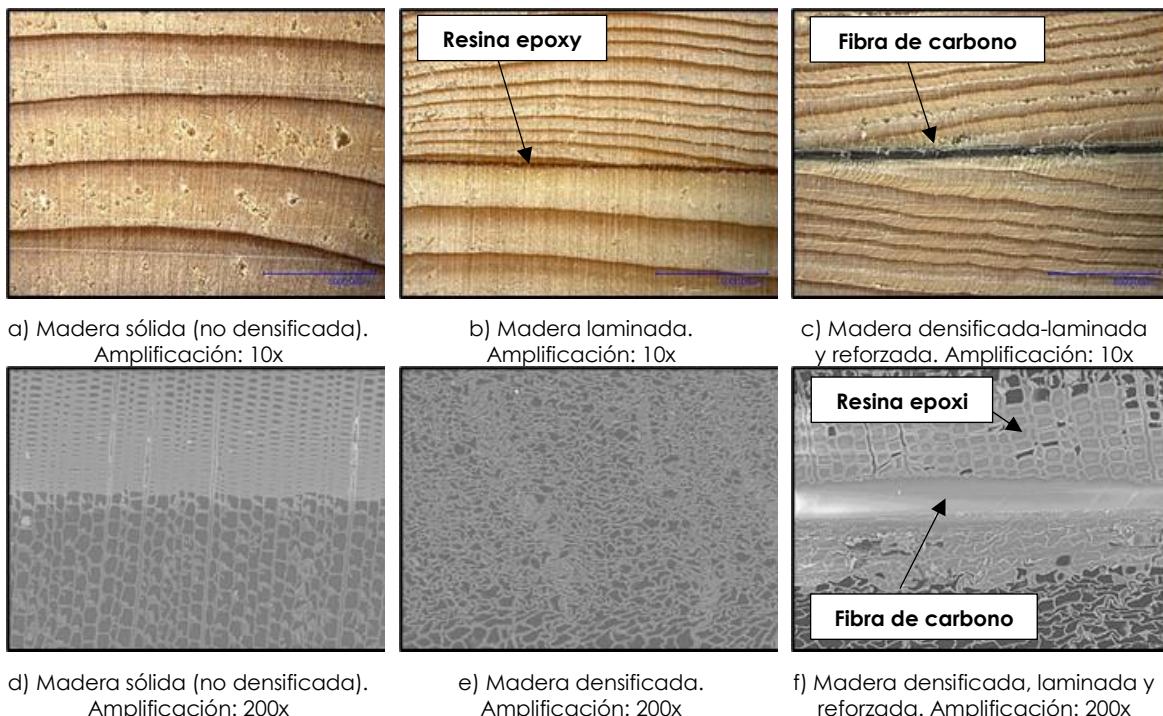


Figura 2. Secciones transversales de las probetas de sugi.
 Nota: Elaboración propia con datos de la investigación.

Esta transformación se percibe a escala microscópica en la madera sólida que muestra regiones heterogéneas en la estructura celular de su sección transversal (Figura 2d) cuya composición a nivel microscópico tiende a homogeneizarse al compactarse (Figura 2e). En la madera densificada, laminada y reforzada (Figura 2f) se advierten las interfaces de adhesivo, adhesivo-madera y madera sólida que componen la zona de sujeción mecánica del sistema madera-resina-fibra (Frihart, 2009). Estos cambios en la estructura material de la madera sugieren explican en parte la alteración de sus valores originales de densidad y módulo dinámico. Otros factores que influyen en el fenómeno son las características propias del adhesivo y el procedimiento para realizar la consolidación del multmaterial (Macedo et al., 2022). En el mismo sentido, la exposición de la madera a la temperatura y presión durante los procesos de laminado y densificado disminuyen el contenido de humedad de las maderas laminadas, densificadas y reforzadas respecto al de la madera sólida (Tabla 1).

Tabla 1
Densidades y módulos dinámicos

Materiales	CH (%)			ρ_{CH} (kg/m ³)		E _{vt} (GPa)		
	μ	μ	σ	CV	μ	σ	CV	
Madera sólida (S)	12	335	19	6,00	7,39	0,72	10,00	
Madera laminada (L)	11	463	12	3,00	10,92	0,28	3,00	
Madera laminada y reforzada (L+F)	11	464	15	3,00	13,97	0,90	7,00	
Madera densificada (D)	11	605	41	7,00	11,38	0,80	7,00	
Madera densificada y laminada (DL)	9	642	18	3,00	15,28	1,77	12,00	
Madera densificada-laminada y reforzada (DL+F)	9	657	14	2,00	16,28	1,14	27,00	

Nota: CH = Contenido de humedad; ρ_{CH} = Densidad; E_{vt} = Módulo dinámico; μ = Media; σ = Desviación estándar; CV = Coeficiente de variación en porciento y entre paréntesis.

Elaboración propia con datos de la investigación.

DISCUSIÓN

El análisis de varianza, tanto de las densidades como de los módulos dinámicos de las seis muestras, sugieren diferencias estadísticamente significativas ($P_{(a=0,5)} < 0,001$) entre las mediciones hechas antes y después de los tratamientos de densificado, laminado y reforzado (Tabla 2). Las pruebas de grupos homogéneos indican que para la densidad de la madera laminada y laminada reforzada no existen diferencias estadísticamente significativas. De manera similar, los módulos dinámicos de la madera densificada y laminada y densificada-laminada y reforzada no presentan diferencias significativas. Estos

resultados coinciden con las diferencias aritméticas perceptibles en las magnitudes para cada grupo de probetas.

Tabla 2
 Resultados del análisis estadístico

Densidad (ρ_{CH})	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	485037	5	97007	199	< 0,001*
Intra grupos	14644	30	488		
Total	499681	35			
Muestras		Grupos Homogéneos			
Madera sólida (S)		X			
Madera laminada (L)			X		
Madera laminada y reforzada (L+F)			X		
Madera densificada (D)				X	
Madera densificada y laminada (DL)					X
Madera densificada-laminada y reforzada (DL+F)					X
Módulo dinámico (E_{vt})	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	324	5	65	58	< 0,001*
Intra grupos	33	30	1		
Total (Corr.)	357	35			
Muestras		Grupos Homogéneos			
Madera sólida (S)		X			
Madera laminada (L)			X		
Madera laminada y reforzada (L+F)			X		
Madera densificada (D)				X	
Madera densificada y laminada (DL)					X
Madera densificada-laminada y reforzada (DL+F)					X

Nota: * = ($P_{(\alpha = 0,5)} < 0,001$) Existe una diferencia estadísticamente representativa; No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que comparten una misma columna de X.
 Elaboración propia con datos de la investigación.

Las densidades de las maderas laminadas, densificadas y reforzadas se incrementan respecto a las de la madera sólida (Figura 3). Este corolario resulta principalmente de la adición de la resina epoxi y por el proceso de densificado. La incorporación del tejido de fibra de carbono no modificó de manera relevante la densidad de la madera reforzada. La densidad de la madera sólida de sugi es similar a la reportada para madera con dimensiones de empleo de esta misma especie (323 kg/m^3) en (Ishiguri et al., 2005). Los tratamientos de laminado, densificado y reforzado disminuyen la variabilidad en la densidad, explicada por la disminución en sus coeficientes de variación, con excepción de la madera densificada y en el módulo dinámico de la madera sólida de sugi. Es decir, los

procesos de modificación físico-mecánica de la madera reducen su heterogeneidad natural (Roohnia & Brancheriu 2015; Zelinka et al., 2014).

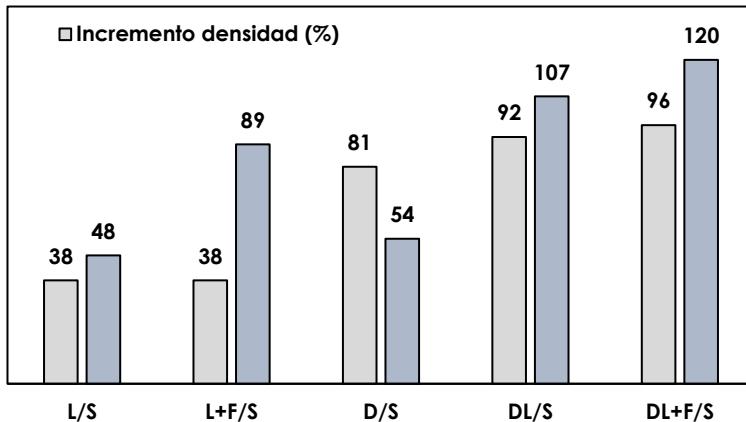


Figura 3. Incrementos de la densidad (ρ_{CH}) y de los módulos dinámicos (E_0) en relación con la madera sólida. Leyenda en Tabla 1.
Nota: Elaboración propia con datos de la investigación.

La densidad de la madera es una de sus características más importantes (Dlouhá, Almérás, Beauchêne, Clair, & Fournier, 2018) y se ve como un buen indicador del módulo de elasticidad (Niklas & Spatz, 2010). La densidad también es clave para predecir el módulo dinámico (Novosel et al., 2021) y juega un papel en la formulación del índice de calidad para recomendar su uso como material en ingeniería (Wegst, 2006). La evidencia empírica indica que, a mayor densidad de la madera, aumenta su módulo dinámico. El enfoque actual en tecnología de la madera sugiere que, si se incrementa artificialmente su densidad, se logrará una ventaja tecnológica al mejorar su resistencia mecánica (Kutnar & Šernek, 2007).

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 sugieren que se distinguen por las diferentes formas y espesores de las paredes y lúmenes celulares. 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, lo que ocasiona que la organización original de las células se distorsione. 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. El tejido de fibra de carbono incrementa poco la proporción de la masa, por lo que no se distingue un aumento significativo entre la madera laminada con resina y con fibra de carbono.

En contraste con la correlación baja entre la densidad y el módulo dinámico, las diferencias aritméticas muestran incrementos en la densidad de 38% (L/S) hasta 96% (DL+F/S) (Figura 3). Por su parte, los coeficientes de variación de los módulos dinámicos de los materiales modificados aumentan respecto a los de la madera sólida de sugi. El módulo dinámico de la madera sólida de sugi (Tabla 1) es 12% menor comparativamente al módulo dinámico en vibraciones longitudinales reportado para esta misma especie ($E = 8,38$ GPa) en Ishiguri et al. (2005). Asimismo, es 5% mayor al módulo de elasticidad (MOE = 7,03 GPa).

Se observa una tendencia en el incremento de los módulos dinámicos en función de las densidades con una correlación lineal baja con un coeficiente de determinación $R^2 = 0,67$ (Figura 4). La madera laminada y la laminada reforzada se agrupan respecto a sus densidades. No obstante, sus módulos dinámicos son mayores respecto a los de la madera únicamente densificada la cual muestra densidades similares. La madera laminada y densificada, así como la madera densificada-laminada y reforzada se agrupan igualmente respecto a sus densidades y, en este caso, no se distingue una diferencia entre sus módulos dinámicos. Ambos materiales denotan módulos dinámicos mayores a los de la madera densificada. Las magnitudes de los módulos dinámicos de la madera sólida de sugi son proporcionales a las de maderas de densidades similares (Figura 4). Empero, los resultados correspondientes a las maderas modificadas se diferencian de la tendencia de los datos de la bibliografía (Tabla 3) respecto a la densidad (Sotomayor-Castellanos, 2019).

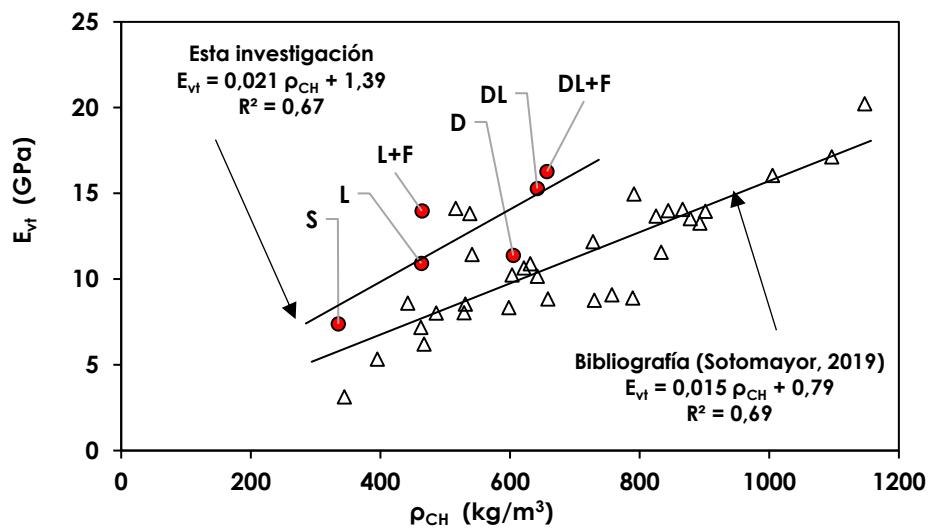


Figura 4. Correlaciones entre los módulos dinámicos (E_{vt}) en función de la densidad (ρ_{CH}) de esta investigación y de los datos de la bibliografía (Sotomayor-Castellanos, 2019). Legenda en Tabla 3.

Nota: Elaboración propia con datos de la investigación.

Tabla 3
 Datos de la bibliografía de densidades y módulos dinámicos (Sotomayor-Castellanos, 2019)

Species	ρ_{CH} (kg/m ³)	E_{vt} (GPa)	Species	ρ_{CH} (kg/m ³)	E_{vt} (GPa)
<i>Abies religiosa</i>	8,77	8,77	<i>Guazuma ulmifolia</i>	730	8,77
<i>Acacia farnesiana</i>	5,34	5,34	<i>Gyrocarpus americanus</i>	395	5,34
<i>Acosmium panamense</i>	12,19	12,19	<i>Juglans pyriformis</i>	728	12,19
<i>Albizia plurijuga</i>	13,27	13,27	<i>Lysiloma acapulcensis</i>	893	13,27
<i>Alnus acuminata</i>	13,83	13,83	<i>Pinus douglasiana</i>	538	13,83
<i>Andira inermis</i>	14,12	14,12	<i>Pinus pseudostrobus</i>	516	14,12
<i>Caesalpinia platyloba</i>	14,08	14,08	<i>Platymiscium dimorphandrum</i>	866	14,08
<i>Cedrela odorata</i>	8,91	8,91	<i>Psidium sartorianum</i>	789	8,91
<i>Cordia elaeagnoides</i>	14,97	14,97	<i>Quercus spp.</i>	791	14,97
<i>Cupressus lindleyi</i>	3,13	3,13	<i>Spathodea campanulate</i>	344	3,13
<i>Dalbergia granadillo</i>	9,10	9,10	<i>Swietenia humilis</i>	757	9,10
<i>Dalbergia paloescrito</i>	8,55	8,55	<i>Swietenia macrophylla</i>	531	8,55
<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	17,13	17,13	<i>Tabebuia chrysanthra</i>	1096	17,13
<i>Fagus Mexicana</i>	8,34	8,34	<i>Tabebuia donnell-smithii</i>	598	8,34
<i>Fraxinus americana</i>	10,66	10,66	<i>Tabebuia rosea</i>	621	10,66
<i>Fraxinus uhdei</i>	8,61	8,61	<i>Tilia mexicana</i>	442	8,61

Nota: CH = 12%; ρ_{CH} = Densidad; E_{vt} = Módulo dinámico
 Elaboración propia con datos de Sotomayor-Castellanos (2019).

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 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. 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 de la madera laminada, densificada y/o reforzada, correspondientes a la dirección tangencial sean mayores en comparación con los de la dirección radial.

Para 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 el 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.

Estos resultados son similares a los de Ulker, Iimirzi, & Burdurlu (2012), quienes usaron procesos higro-termo-mecánicos para densificar madera de *Pinus sylvestris* (pino silvestre) y reportaron aumentos del 93% en la densidad y del 114% en su módulo de elasticidad. Fang, Cloutier, Blanchet, & Koubaa (2012) informan que tras el densificado de *Populus tremuloides* (álaro temblón), su densidad crece un 97% y su módulo de elasticidad aumenta un 60%. En el mismo contexto, Gao et al. (2016) informan que la madera densificada de *Populus tomentosa* (álaro blanco) muestra un aumento del 100% en la densidad y del 73% en el módulo de elasticidad.

CONCLUSIONES

Se determinaron la densidad y los módulos dinámicos por vibraciones transversales en probetas de madera de sugi. 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.

Los tratamientos de laminado, densificado y reforzado con fibra de carbono realizados a la madera sólida de sugi incrementan sus densidades y sus módulos dinámicos. Esta mejora tecnológica se explica por el efecto del tratamiento de densificado, por la utilización de resina epoxi como adhesivo y por la incorporación de tejido de fibra de carbono como refuerzo.

Se recomienda determinar los valores característicos de los materiales aquí estudiados siguiendo procedimientos normalizados y empleando piezas con dimensiones de empleo. De tal forma que los resultados de esta investigación puedan transferirse para fines de diseño y cálculo de productos y estructuras de madera.

Agradecimientos

La investigación fue patrocinada por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México y por la Universidad Prefectoral de Akita, Japón.

REFERENCIAS

- Bal, B. C. (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>
- Brémaud, I., El Kaïm, Y., Guibal, D., Minato, K., Thibaut, T., & Gril, J. (2012). Characterization and categorization of the diversity in viscoelastic vibrational

properties between 98 wood types. *Annals of Forest Science*, 69(3), 373-386.

<https://doi.org/10.1007/s13595-011-0166-z>

- Dlouhá, J., Almérás, T., Beauchêne, J., Clair, B., & Fournier, M. (2018). Biophysical dependences among functional wood traits. *Functional Ecology*, 32(12), 2652–2665. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13209>
- Fang, C. H., Cloutier, A., Blanchet, P., & Koubaa, A. (2012). Densification of wood veneers combined with oil heat treatment. Part II: Hygroscopicity and mechanical properties. *BioResources*, 7(1), 925-935. <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/densification-of-wood-veneers-combined-with-oil-heat-treatment-part-ii-hygroscopicity-and-mechanical-properties/>
- Faydi, Y., Brancherieu, L., Pot, G., & Collet, R. (2017). Prediction of oak wood mechanical properties based on the statistical exploitation of vibrational response. *BioResources*, 12(3), 5913-5927. <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/prediction-of-oak-wood-mechanical-properties-based-on-the-statistical-exploitation-of-vibrational-response/>
- 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>
- Gaff, M., Vokatý, V., Babiak, M., & Bal, B. C. (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>
- Gao, Z., Huang, R., Lu, J., Chen, Z., Guo, F., & Zhan, T. (2016). Sandwich compression of wood: Control of creating density gradient on lumber thickness and properties of compressed wood. *Wood Science and Technology*, 50(4), 833-844. <https://doi.org/10.1007/s00226-016-0824-2>
- Hayashi, T., & Miyatake, A. (2015). Recent research and development on sugi (*Cryptomeria japonica*) structural glued laminated timber. *Journal of Wood Science*, 61, 337-342. <https://doi.org/10.1007/s10086-015-1475-x>
- International Organization for Standardization. (2014a). 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 tests. International Organization for Standardization.
- International Organization for Standardization. (2014b). ISO 13061-2:2014. Physical and mechanical properties of wood. Test methods for small clear wood specimens.

Part 2: Determination of density for physical and mechanical tests. International Organization for Standardization.

- Ishiguri, F., Kasai, S., Yokota, S., Iizuka, K., & Yoshizawa, N. (2005). Wood quality of sugi (*Cryptomeria japonica*) grown at four initial spacings. *IAWA Journal*, 26(3), 375-386. <https://doi.org/10.1163/22941932-02603008>
- 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, M. N., & 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>
- Kliger, I. R., Haghani, R., Brunner, M., Harte, A. M., & 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. En J. C. F. Walker, Primary wood processing: Principles and practice (pp. 347-381). Springer. <https://doi.org/10.1007/1-4020-4393-7>
- Kutnar, A., & Šernek, M. (2007). Densification of wood. *Zbornik gozdarstva in lesarstva*, 82, 53-62. <http://eprints.gozdis.si/id/eprint/198>
- Macedo-Alquicira, I., Bedolla-Arollo, J., Raya-González, D., Rutiaga-Quiñones, J. G., Castro-Sánchez, F. J., & Sotomayor-Castellanos, J. R. (2022). Pruebas de torsión dinámica de madera sólida y de multimaterial de *Fagus crenata*. *Bosques Latitud Cero*, 12(2), 93-102. https://www.academia.edu/94061774/Pruebas_de_torsi%C3%B3n_din%C3%A1mica_de_madera_s%C3%B3lida_y_de_multimaterial_de_Fagus_crenata
- Niklas, K. J., & Spatz, H. C. (2010). Worldwide correlations of mechanical properties and green wood density. *American Journal of Botany*, 97(10), 1587-1594. <https://doi.org/10.3732/ajb.1000150>
- 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>

- Rescalvo, F. J., 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>
- Román-Jordán, E., Esteban, L. G., de Palacios, P., & Fernández, F. G. (2017). Comparative wood anatomy of the Cupressaceae and correspondence with phylogeny, with special reference to the monotypic taxa. *Plant Systematics and Evolution*, 303, 203-219. <https://doi.org/10.1007/s00606-016-1364-9>
- Roohnia, M., & Brancheriu, L. (2015). Orientation and position effects of a local heterogeneity on flexural vibration frequencies in wooden beams. *CERNE*, 21(2), 339-344. <https://doi.org/10.1590/01047760201521021674>
- Schober, K. U., Harte, A. M., Klinger, R., Jockwer, R., Xu, Q., & Chen, J.-F. (2015). FRP reinforcement of timber structures. *Construction and Building Materials*, 97, 106-118. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.020>
- 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. *Forests*, 10(5), 401. <https://doi.org/10.3390/f10050401>
- Śliwa-Wieczorek, K., Ostrowski, K. A., 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, J. R. (2019). Módulos de elasticidad e índices de calidad de maderas mexicanas. Síntesis de datos del Laboratorio de Mecánica de la Madera. *Investigación e Ingeniería de la Madera*, 15(1), 3-64. https://www.researchgate.net/publication/335665376_Modulos_de_elasticidad_e_indices_de_calidad_de_maderas_mexicanas_Sintesis_de_datos_del_Laboratorio_de_Mecanica_de_la_Madera
- Sotomayor-Castellanos, J. R., & Macedo-Alquicira, I. (2023). Vibraciones transversales para determinar el módulo dinámico e índice material en multimaterial de madera-malla-adhesivo en *Fagus crenata*. *Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica*, 11, 39-62. https://www.academia.edu/104221042/Vibraciones_transversales_para_determinar

_el_m%C3%B3dulo_din%C3%A1mico_e_%C3%ADndice_material_en_multimaterial_de_madera_malla_adhesivo_en_Fagus_crenata

- 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>
- Ulker, O., Imirzi, O., & Burdurlu, E. (2012). The effect of densification temperature on some physical and mechanical properties of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *BioResources*, 7(4), 5581-5592. <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/the-effect-of-densification-temperature-on-some-physical-and-mechanical-properties-of-scots-pine-pinus-sylvestris-l/>
- Wang, B., Bachtiar, E. V., Yan, L., Kasal, B., & Fiore, V. (2019). Flax, basalt, e-glass FRP and their hybrid FRP strengthened wood beams: An experimental study. *Polymers*, 11(8), 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(23), 5451. <https://doi.org/10.3390/ma13235451>
- Wegst, U. G. K. (2006). Wood for sound. *American Journal of Botany*, 93(10), 1439-1448. <https://doi.org/10.3732/ajb.93.10.1439>
- Yusof, A., & Rahman, A. B. (2017). Flexural strengthening of timber beams using carbon fibre reinforced. *International Journal of Applied Engineering Research*, 12(3), 348-358. https://www.ripublication.com/ijaer17/ijaerv12v3_12.pdf
- Zelinka, S. L., Altgen, M., Emmerich, L., Guigo, N., Keplinger, T., Kymäläinen, M., Thybring, E. E., & Thygesen, L. G. (2022). Review of wood modification and wood functionalization technologies. *Forests*, 13(7), 1004. <https://doi.org/10.3390/f13071004>