

Caracterización por ultrasonido de madera sólida y laminada de *Fagus crenata*

Ultrasonic characterization of solid and laminated wood of *Fagus crenata*

Javier Ramón Sotomayor Castellanos^{1*}, Firas Hawasly², Koji Adachi², Sonia Correa Jurado¹

¹ Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México.

² Universidad Prefectoral de Akita, Japón.

*Correspondencia: javier.sotomayor@umich.mx (Javier Ramón Sotomayor Castellanos)

DOI: <https://doi.org/10.54167/tch.v18i3.1636>

Recibido: 30 de agosto de 2024; Aceptado: 08 de noviembre de 2024

Publicado por la Universidad Autónoma de Chihuahua, a través de la Dirección de Investigación y Posgrado.

Editor de Sección: Dr. Humberto González-Rodríguez

Resumen

El objetivo de la investigación fue determinar la densidad, la velocidad del ultrasonido y el módulo dinámico de la madera de *Fagus crenata* sólida y laminada. Se realizaron mediciones de la velocidad del ultrasonido en nueve posiciones en la dirección radial y tres en las direcciones tangencial y longitudinal en seis probetas de madera sólida y seis de laminada, empleando resina de melamina-urea formaldehído como adhesivo. Se diseñó un experimento completamente al azar. La densidad de la madera laminada experimentó un incremento del 18 % en comparación con la de la madera sólida. El laminado de la madera de *F. crenata* incrementa tanto la velocidad como el módulo dinámico de la madera laminada en las direcciones radial 70 % y longitudinal 1 %, mientras que disminuye en la dirección tangencial 19%. El proceso de laminación de madera reduce la variabilidad natural de la velocidad del ultrasonido en un 2 % y del módulo dinámico en un 5 %. Los resultados de la investigación se ven limitados por el uso de probetas de pequeñas dimensiones. Es recomendable realizar experimentos con probetas de dimensiones similares a las dimensiones reales del trabajo para el cálculo ingenieril de elementos estructurales.

Palabras clave: velocidad del ultrasonido, módulo dinámico, melamina-urea formaldehído, densidad de la madera, probetas de pequeñas dimensiones.

Abstract

The objective of the research was to determine the density, ultrasound velocity, and dynamic modulus of solid and laminated *Fagus crenata* wood. Measurements of ultrasound speed were taken at nine positions in the radial direction and three in the tangential and longitudinal directions on six solid wood samples and six laminated samples using melamine-urea formaldehyde resin as the adhesive. A completely randomized experiment was designed. The density of laminated wood experienced an 18 % increase compared to solid wood. The lamination of *F. crenata* wood increases both the speed and the dynamic modulus of the laminated wood in the radial direction by 70 % and in the longitudinal direction by 1 %, while it decreases in the tangential direction by 19 %. The wood lamination process reduces the natural variability of ultrasound speed by 2 % and the dynamic modulus by 5 %. The results of the research are limited by the use of small-sized specimens. It is advisable to conduct experiments with similar specimens to the actual dimensions in the field for the engineering calculation of structural elements.

Keywords: ultrasound velocity, dynamic modulus, melamine-urea formaldehyde, wood density, small specimens.

1. Introducción

Dadas las características morfológicas y dimensionales de los árboles, las dimensiones de las secciones transversales y la longitud de la madera aserrada son restringidas, lo que obstaculiza su aplicación en productos utilitarios. Este problema puede ser abordado mediante la reconstitución de componentes fabricados a partir de placas de madera, orientadas en dirección longitudinal y unidas con un adhesivo apropiado para un uso específico (Kandler *et al.*, 2015). Los beneficios primordiales de esta tecnología incluyen la reducción de la heterogeneidad natural de la madera, la diversificación de dimensiones y formas de diseño, así como la utilización de especies que no son altamente valoradas tecnológicamente (López *et al.*, 2013).

La madera laminada proporciona a los ingenieros y diseñadores la posibilidad de trabajar con un material más homogéneo, minimizando la variabilidad intrínseca de las propiedades mecánicas de la madera aserrada. La finalidad de esta tecnología es la fabricación de elementos de uso estructural elaborados a partir de láminas consolidadas con adhesivos apropiados que conserven una resistencia análoga o superior a la de la madera utilizada en su fabricación (Hussin *et al.*, 2022). En diversas aplicaciones, la madera laminada se emplea en la producción de vigas y columnas para estructuras de madera (Icimoto *et al.*, 2016).

La resistencia mecánica de un componente de madera laminada es influenciada por diversos factores, entre los que se incluyen la especie, el número, la disposición de las placas y el tipo de adhesivo empleado (Koutsianitis *et al.*, 2021, Park *et al.*, 2021, Bhkari *et al.*, 2023). La resina de melamina-urea formaldehído, un adhesivo ampliamente utilizado en la producción de madera laminada, ha evidenciado que optimiza las propiedades físicas y mecánicas de la madera (Altun y Tokdemir, 2017).

La determinación del módulo de elasticidad de los componentes de madera laminada con dimensiones de uso se realiza a través de procedimientos experimentales normalizados (Slabohm y Militz, 2014). Por otro lado, estudios que examinan diversos adhesivos en madera laminada de

pequeñas dimensiones han evidenciado la influencia de factores de variación en el desarrollo de nuevos productos a través de la utilización de muestras de pequeña escala (Lee y Oh, 2023). El módulo dinámico se determina mediante ensayos de carácter no destructivo. Los ejemplos incluyen vibraciones (Brémaud *et al.*, 2012) y ultrasonido (Bachtiar *et al.*, 2017). La determinación del módulo dinámico en la madera o materiales compuestos requiere una evaluación caso por caso y especie por especie debido a la amplia gama de especies y configuraciones experimentales disponibles (Sotomayor y Correa, 2016).

La madera de *Fagus crenata* se emplea extensivamente en la producción de mobiliario, en el sector de la construcción y en otros productos de madera de valor añadido (Naruse, 2003; Sotomayor *et al.*, 2020). Los módulos de elasticidad establecidos bajo condiciones estáticas, tal como se exponen en la literatura académica, son: $E_R = 882 \text{ MN m}^{-2}$, $E_T = 588 \text{ MN m}^{-2}$ y $E_L = 11760 \text{ MN m}^{-2}$; los módulos de rigidez son: $G_{LR} = 980 \text{ MN m}^{-2}$, $G_{LT} = 637 \text{ MN m}^{-2}$ y $G_{RT} = 196 \text{ MN m}^{-2}$ para una densidad de 740 kg m^{-3} y un contenido de humedad de 8 % (Naruse, 2003). Los módulos dinámicos por ultrasonido (us) son: $E_{us R} = 2644 \text{ MN m}^{-2}$, $E_{us T} = 1949 \text{ MN m}^{-2}$ y $E_{us L} = 13992 \text{ MN m}^{-2}$ para una densidad de 629 kg m^{-3} y un contenido de humedad de 11% (Sotomayor *et al.*, 2020). Los subíndices indican la dirección radial (R), tangencial (T) y longitudinal (L) de la madera. No se detectó información acerca del módulo dinámico de madera laminada.

La hipótesis de investigación postula que la densidad, la velocidad del ultrasonido y el módulo dinámico de la madera sólida de *F. crenata* experimentan un incremento como consecuencia del proceso de laminación. El propósito de la investigación consistió en establecer estos parámetros de la madera de *F. crenata* en estado sólido y laminado con el fin de corroborar la hipótesis planteada. Para alcanzar este objetivo, se elaboraron muestras de tamaño reducido y se implementó un protocolo original para la realización de pruebas por ultrasonido.

2. Materiales y métodos

2.1 Materiales

El material experimental consistió en dos grupos de probetas preparadas de un mismo segmento de la parte baja del fuste de un árbol de *F. crenata*. El ejemplar fue recolectado durante el periodo de marzo 2022 a febrero de 2023 en la prefectura de Akita ($39^{\circ}43'07''\text{N}$; $140^{\circ}06'09''\text{E}$), Japón. El primer grupo consistió en seis placas de madera sólida con dimensiones de 21 mm por 150 mm por 150 mm orientadas en las direcciones radial, tangencial y longitudinal de la madera. El segundo grupo consistió en seis probetas de madera elaborada con 21 láminas de espesor de 1 mm. Sus dimensiones fueron similares a las de la madera sólida. Las láminas se acomodaron en forma paralela a la dirección longitudinal. La madera sólida y laminada fueron elaboradas por la empresa Kitanihon-Board Industries (Akita, Japón).

Para confeccionar la madera laminada se utilizó como adhesivo resina de melamina-urea formaldehído extendida 200 kg m^{-2} (Oshika resin PWP-73, 3, Oshika Corporation, Japan). Para su consolidación se aplicó presión de 10 kg m^{-2} y temperatura de $110 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Las probetas se almacenaron en una cámara de acondicionamiento con temperatura de $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y una humedad relativa del aire de 65 %, hasta que alcanzaron un contenido de humedad en equilibrio de 9 %. El contenido de humedad

de la madera se determinó con la diferencia de pesos al momento del ensayo y en estado seco (International Organization for Standardization, 2014a). La densidad de la madera se determinó con la relación peso/volumen (International Organization for Standardization, 2014b).

2.2 Métodos

Las pruebas de ultrasonido consistieron en medir el tiempo de transmisión de la onda mecánica a través de la distancia entre dos sensores posicionados en la probeta empleando el aparato Sylvatest® con frecuencia de 22 kHz (Fig. 1). La probeta se colocó en el dispositivo fabricado en la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera (Sotomayor *et al.*, 2011) para realizar pruebas no destructivas en probetas de pequeñas dimensiones adaptando los procedimientos reportados en Sotomayor (2020). La velocidad del ultrasonido se calculó con la relación distancia/tiempo de transmisión. Las mediciones se realizaron en nueve posiciones en la dirección radial y tres en las direcciones tangencial y longitudinal. Los promedios de las mediciones en cada dirección se consideraron para análisis posterior (Fig. 2).

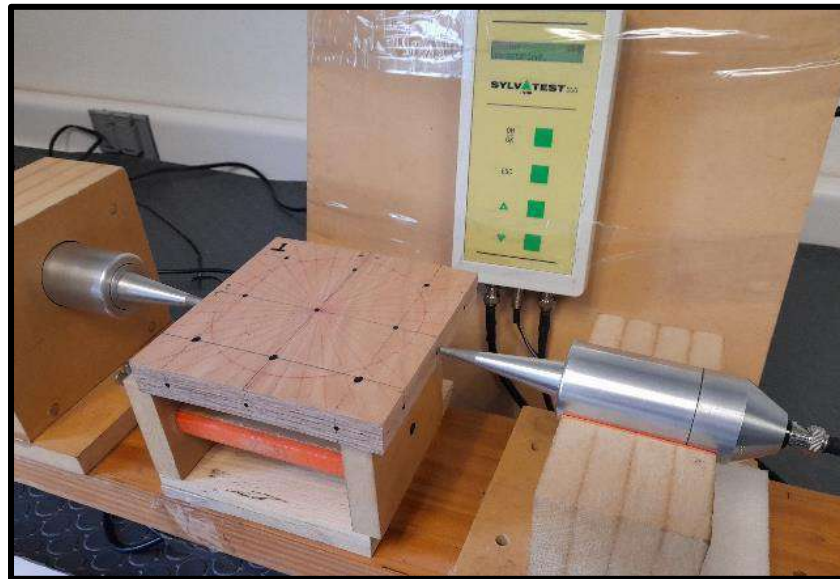


Figura 1. Prueba de ultrasonido en una probeta de madera laminada de *Fagus crenata*

Figure 1. Ultrasound test on a specimen of *Fagus crenata* laminated wood

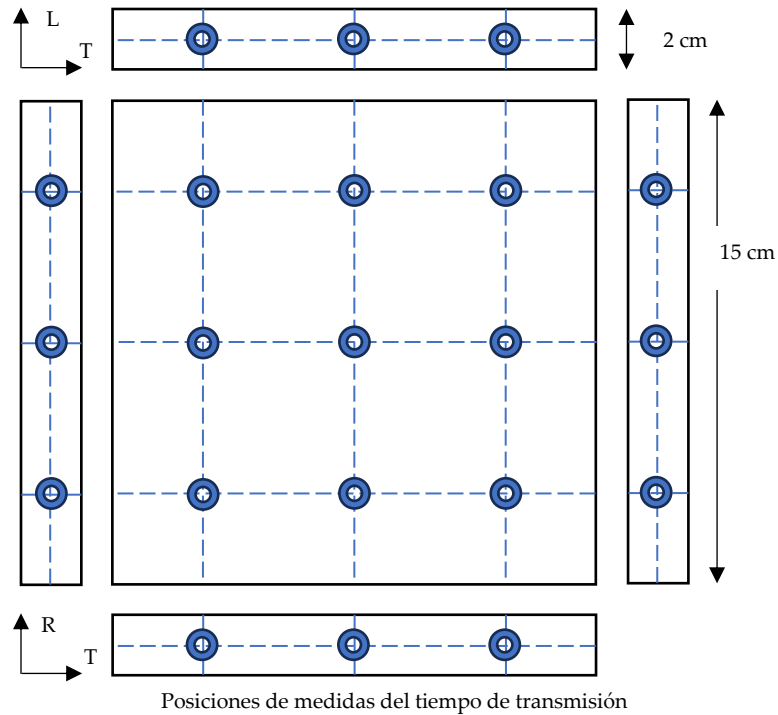


Figura 2. Esquema de la probeta de *Fagus crenata* y las posiciones donde se tomaron las medidas del tiempo de transmisión del ultrasonido. R = Dirección radial; T = Dirección tangencial; L = Dirección longitudinal

Figure 2. Diagram of the *Fagus crenata* specimen and the positions where the ultrasound transmission time measurements were taken. R = radial direction; T = tangencial direction; L = longitudinal direction.

La probeta se considera constituida de madera idealizada como un material sólido, de medio continuo, elástico y macroscópicamente homogéneo. Conforme a las hipótesis de que su momento de inercia y sección transversal son uniformes a lo largo de la probeta, así como que su módulo dinámico y de rigidez son igualmente constantes respecto a su volumen, los teoremas del análisis dinámico pueden ser utilizados y así, proponer la ecuación de movimiento (Ec. 1) para la probeta en vibraciones longitudinales (Brancheriau y Bailleres, 2002):

$$E \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

E = Módulo dinámico

ρ = Densidad

u = Desplazamiento

x = Coordenada espacial

t = Tiempo

La ecuación (1) se puede reescribir como:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

v = Velocidad de propagación de la onda

Con:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (\text{Ec. 3})$$

El módulo dinámico se determinó con la Ecuación (4) (Bachtiar *et al.*, 2017):

$$E_{us} = \rho_{CH} \times v_{us}^2 \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:

E_{us} = Módulo dinámico (N m⁻²)

ρ_{CH} = Densidad (kg m⁻³)

v_{us} = Velocidad del ultrasonido (m s⁻¹)

2.3 Diseño experimental

Se diseñó un experimento completamente al azar. Dos grupos formaron la unidad experimental. Un primer grupo de madera sólida y un segundo grupo de madera laminada, ambos de *F. crenata*. La densidad (ρ_{CH}), la velocidad del ultrasonido (v_{us}) y el módulo dinámico de la madera sólida (E_{us}) fueron las variables de entrada. Las variables de salida fueron la densidad, la velocidad del ultrasonido y el módulo dinámico de la madera laminada. El laminado se consideró el tratamiento con tres niveles: radial, tangencial y longitudinal. Por lo tanto, se formaron catorce muestras con seis replicas cada una. El contenido de humedad (CH) se consideró parámetro de referencia. Su media (μ), desviación estándar (σ) y coeficiente de variación ($CV = \sigma/\mu$) se determinaron. Se realizaron pruebas de normalidad de distribución de datos en cada muestra (Kolmogorov-Smirnov). Valores del sesgo estandarizado (SE) y del apuntamiento estandarizado (AE) en el intervalo [-2, +2] fueron el criterio de demarcación para aceptar una distribución normal de la muestra.

Para contrastar la hipótesis nula $H_0: \sigma_1 - \sigma_2 = 0$ con la hipótesis alterna $H_A: \sigma_1 - \sigma_2 \neq 0$, donde los subíndices 1 y 2 representan las variables a cotejar, se realizaron pruebas de verificación de varianza (Ver-var) y análisis de varianza (Anova). El criterio de demarcación para aceptar diferencias estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95 % fue un valor $P_{(\alpha = 0,05)} < 0,05$. Se llevaron a cabo pruebas en grupos homogéneos. El criterio de demarcación para negar la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre niveles fue que comparten una misma columna de X. Los cálculos estadísticos se realizaron utilizando el programa informático Statgraphics XVI®.

3. Resultados y discusión

3.1 Densidad

La densidad de la madera laminada aumentó en comparación con la de la madera sólida. Este resultado coincide con el propósito de incrementar artificialmente la densidad de una especie de madera en particular, al emplear el tratamiento de laminado. Esta estrategia se respalda en uno de los paradigmas vigentes en Ciencias, Tecnología e Ingeniería de la Madera, el cual propone que las características de resistencia mecánica de la madera, en este caso el módulo dinámico, aumentan proporcionalmente a la densidad (Niklas y Spatz, 2010). Comparada con la madera sólida, la madera laminada tiene una densidad mayor de 18 % (Tabla 1) lo cual es consistente con el resultado del análisis estadístico ($P_{(\alpha=0.05)} < 0.05$) que indica una diferencia estadística entre las densidades de estas maderas (Tabla 2). Este incremento refleja la incorporación del peso del adhesivo en la madera laminada, así como el efecto de la compactación de sus láminas. De tal forma que la madera laminada es más homogénea y compacta.

Tabla 1. Densidad, contenido de humedad, velocidad del ultrasonido y módulo dinámico de madera sólida y laminada de *Fagus crenata*

Table 1. Density, moisture content, ultrasound velocity and dynamic modulus of solid and laminated *Fagus crenata* wood

	ρ_{CH} (kg m^{-3})	CH (%)	$v_{us} R$ (m s^{-1})	$E_{us} R$ (MN m^{-2})	$v_{us} T$ (m s^{-1})	$E_{us} T$ (MN m^{-2})	$v_{us} L$ (m s^{-1})	$E_{us} L$ (MN m^{-2})
Madera sólida de <i>Fagus crenata</i>								
μ	695	9	1709	2033	1748	2127	4900	16732
σ	8	0,43	62	145	63	168	240	1813
CV	(1)	(5)	(4)	(7)	(4)	(8)	(5)	(11)
Madera laminada de <i>Fagus crenata</i>								
μ	822	9	2906	6945	1424	1669	4949	20141
σ	14	0,34	66	315	16	46	48	470
CV	(2)	(5)	(2)	(5)	(1)	(3)	(1)	(2)

ρ_{CH} = Densidad para un contenido de humedad CH; CH = Contenido de humedad; v_{us} = Velocidad del ultrasonido; E_{us} = Módulo dinámico; R = Dirección radial; T = Dirección tangencial; L = Dirección longitudinal; μ = Media; σ = Desviación estándar; CV = Coeficiente de variación en por ciento y entre paréntesis

Tabla 2. Análisis estadístico**Table 2.** Statistical analysis

<i>Fagus crenata</i> Material	SE [-2, +2]	AE [-2, +2]	Ver-var $P_{(\alpha = 0.05)}$	Anova $P_{(\alpha = 0.05)}$	Grupos homogéneos
Densidad					
Sólida	0.670	-0.849	0.608	<0.001*	X
Laminada	0.128	0.282	-	-	X
Velocidad del ultrasonido					
Sólida radial	0.577	-0.587	0.788	<0.001*	X
Laminada radial	-1.017	0.456	-	-	X
Sólida tangencial	-0.759	-0.204	0.078	<0.001*	X
Laminada tangencial	-0.127	-1.180	-	-	X
Sólida longitudinal	0.809	0.102	0.017*	0.635	X
Laminada longitudinal	0.110	-0.915	-	-	X
Módulo dinámico					
Laminada radial	0.366	-0.831	0.069	<0.001*	X
Sólida tangencial	-0.830	-0.175	-	-	X
Laminada tangencial	-0.784	-0.407	0.057	<0.001*	X
Sólida longitudinal	0.450	-0.633	-	-	X
Laminada longitudinal	0.959	0.181	0.036*	0.001*	X
Laminada radial	-0.424	-0.909	-	-	X

SE = Sesgo estandarizado; AE = Apuntamiento estandarizado; Ver-var = Verificación de varianza; Anova = Análisis de varianza; * = Existe una diferencia significativa para $P_{(\alpha = 0.05)} < 0.05$. En los niveles que comparten una misma columna de X no existen diferencias estadísticamente significativas entre ellos.

Con respecto al coeficiente de variación de la densidad, el de la madera sólida es de 1 %, mientras que el de la madera laminada aumenta al 2 %. Estos porcentajes son pequeños respecto a los descritos en la literatura (Kallarackal y Ramírez, 2024), lo que indica que las probetas de madera sólida y laminada tienen una densidad uniforme al interior de las muestras, pero diferente entre ellas.

En el caso del cálculo de la densidad de probetas pequeñas, la contribución de la proporción del peso del adhesivo es evidente, a diferencia de los resultados de trabajos con vigas laminadas donde no se hace mención particular al respecto. Para el caso de la presente investigación, el aumento de la densidad en la madera laminada, al ponderarlo con la velocidad del ultrasonido (Ec. 1), se verá reflejado en el incremento del módulo dinámico. De esta forma, la primera aseveración de la

hipótesis de la investigación se confirma: el laminado aumenta la densidad de la madera sólida de *F. crenata*.

El valor promedio para el contenido de humedad de la madera sólida y en la laminada fue de 9 % con un coeficiente de variación promedio de 5 %. El rango de valores medios y el de los coeficientes de variación del contenido de humedad indican que la madera puede ser considerada en estado seco, con una variación mínima en el contenido de humedad. Este resultado favorece la propuesta del diseño experimental al considerar el contenido de humedad de la madera como un parámetro de referencia que no interviene en el fenómeno estudiado.

Los hallazgos de la bibliografía varían según la especie en estudio y las especificaciones para la fabricación de la madera laminada. Por ejemplo, Keskin (2009) reporta un incremento en la densidad de la madera laminada con respecto a la madera sólida de 3.4 % para *Fagus orientalis* y de 4.2 % para *Quercus pétre*a. En cambio, Komariah et al. (2015) reportan una disminución de densidad en la madera laminada de 16.8 % para *Acacia mangium*, al mismo tiempo que determinan un aumento de 23.2 % para *Maesopsis eminii* y de 7 % para *Falcataria moluccana*. Este resultado sugiere la observación de este fenómeno caso por caso, es decir, especie por especie en seguimiento al paradigma en investigación de las características físicas de la madera y sus productos compuestos (Sotomayor y Correa, 2016): "... es necesario caracterizar el comportamiento mecánico de la madera con un enfoque de experimentación de caso por caso de una especie en particular. Cada procedimiento debe estar referido a las variables de referencia de las condiciones de ensayo, por ejemplo, la densidad y el contenido de humedad de la madera, y con datos derivados de un tamaño de muestra observada estadísticamente representativa. Una vez teniendo observaciones integrantes y estadísticamente representativas, se pueden proponer tendencias en el comportamiento general para una especie en específico, o por agrupamiento de varias de ellas que denoten una tendencia similar".

3.2 Velocidad del ultrasonido

La velocidad del ultrasonido en la dirección radial en la madera laminada es mayor 70 % respecto a la velocidad de la madera sólida. En cambio, en la dirección tangencial disminuye 19 % (Tabla 1). Estas diferencias numéricas se confirman con los resultados del análisis estadístico. En efecto, el análisis de varianza indica diferencias para las direcciones radial y tangencial. Por su parte, los resultados de las pruebas de grupos homogéneos igualmente coinciden (Tabla 2). Estos resultados se presentan de manera gráfica en la Fig. 3a.

En la dirección longitudinal se nota un incremento de 1 % en la madera laminada. Empero, no se percibe una variación estadísticamente significativa $P_{(\alpha = 0.05)} = 0.635$. Sin embargo, la prueba de verificación de varianza indica un valor $P_{(\alpha = 0.05)} = 0.017$, lo que implica que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar. Esto viola uno de los supuestos en el análisis de varianza e invalidará la prueba anova. Este resultado puede ser explicado por la repetitividad en las mediciones del tiempo de transmisión del ultrasonido en las probetas de madera laminada, las cuales varían en un rango de 112 m s^{-1} (para una media de 4900 m s^{-1}) lo que resulta en un coeficiente de variación de 1 % en comparación a las mediciones en la madera sólida con un rango de 653 m s^{-1} (para una media de 4949 m s^{-1}), el cual resulta en un coeficiente de variación de 5 %. Aceptando esta particularidad estadística, se puede aceptar la diferencia mínima entre los módulos señalada anteriormente.

Respecto a la variabilidad de la velocidad del ultrasonido, expresada por el coeficiente de variación, para la madera sólida fluctúa entre 4 y 5 %. En cambio, para la laminada se observa una disminución que va de 1 a 2 %. Esta diferencia se puede interpretar como una mejora tecnológica en la madera laminada al disminuir la fluctuación de las magnitudes de la velocidad en la madera confeccionada con laminillas de *F. crenata* y consolidada con adhesivo de melamina-urea formaldehído (Altun y Tokdemir, 2017).

Estos resultados particulares para las direcciones radial y longitudinal respaldan la conjetura de que el tratamiento de laminado de madera sólida de *F. crenata* aumenta la velocidad del ultrasonido. No obstante, esta hipótesis no se verifica en la dirección tangencial.

Las condiciones del laboratorio se mantuvieron bajo control, las pruebas se llevaron a cabo de la misma manera y se identificaron las principales fuentes que podrían haber causado variaciones en los resultados. Es decir, el tipo de adhesivo que se usa para hacer madera laminada, la forma, las dimensiones y el contenido de humedad de la madera. Los coeficientes de variación entre la madera sólida y la madera laminada disminuyeron. El resultado para el módulo dinámico fue idéntico.

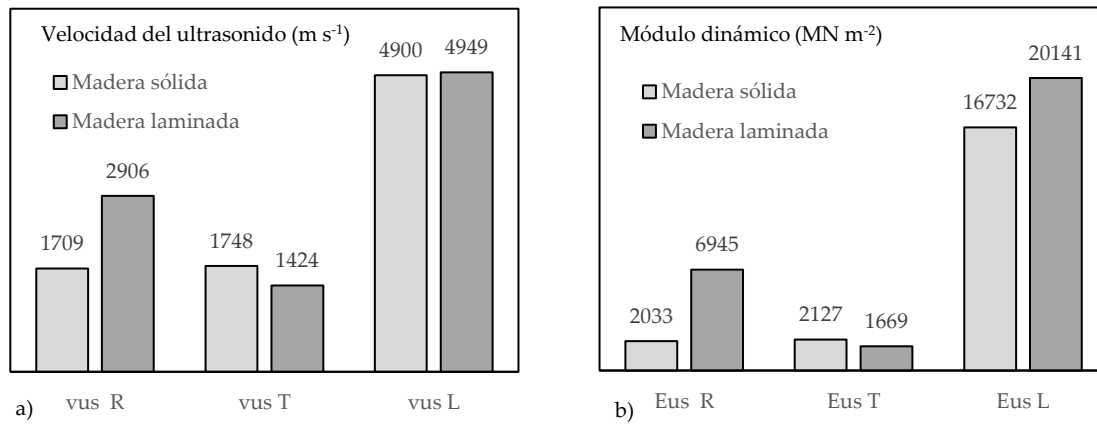


Figura 3. Comparativos: a) de la velocidad del ultrasonido (v_{us}); b) del módulo dinámico (E_{us}). R = Dirección radial, T = Dirección tangencial, L = Dirección longitudinal

Figure 3. Comparatives: a) of the speed of ultrasound (v_{us}); b) of the dynamic modulus (E_{us}). R = Radial direction, T = Tangential direction, L = Longitudinal direction

3.3 Módulo dinámico

El módulo dinámico de la madera laminada en la dirección radial se incrementa 242 % respecto al de la madera sólida. Por su parte, el módulo longitudinal aumenta 20 %. En el sentido opuesto y coincidiendo con la disminución de la velocidad tangencial, el módulo en esta dirección disminuye 22 % (Tabla 1). Estas variaciones son confirmadas por el análisis de varianza y las pruebas de grupos homogéneos, los cuales diferencian los módulos dinámicos entre la madera sólida y

laminada en las tres direcciones de anisotropía (Tabla 2). Estos resultados se presentan de manera gráfica en la Fig. 3b.

Uno de los objetivos de fabricar madera laminada es la homogenización de sus propiedades mecánicas (Daoui *et al.*, 2011). Los resultados de la Tabla 1 muestran que los coeficientes de variación del módulo dinámico de la madera sólida oscilan entre el 7 % en la dirección radial y el 11 % en la dirección longitudinal. En la madera laminada, este orden de valores disminuye con coeficientes de variación del 2 % en la dirección longitudinal y del 5 % en la dirección radial.

Estos resultados y su relevancia para la validación de la hipótesis son similares a los de la velocidad del ultrasonido: se ha demostrado que el laminado de madera sólida mejora su módulo dinámico tanto en las direcciones radiales como longitudinales. Sin embargo, este corolario no es aplicable a la dirección tangencial (Macedo y Sotomayor, 2021).

4. Conclusiones

Se calculó el módulo dinámico de probetas de pequeñas dimensiones tanto de madera sólida como laminada de *F. crenata* y se determinó experimentalmente la densidad. Así, se logró comparar estos parámetros y los coeficientes de variación entre los dos tipos de materiales.

La densidad aparente y su variabilidad aumentan como efecto del tratamiento de laminado. En cambio, el laminado de la madera disminuye la variabilidad de la velocidad del ultrasonido y del módulo dinámico.

Los resultados de la investigación se ven limitados por el uso de probetas de pequeñas dimensiones. Es recomendable realizar experimentos con probetas de dimensiones similares a las dimensiones reales del trabajo para el cálculo ingenieril de elementos estructurales.

Contribuciones de los autores

J.R.S.C., F.H., K.A. y S.C.J. participaron en la concepción de la investigación, en los trabajos de laboratorio, en el análisis de resultados y en la redacción-revisión del artículo. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Agradecimientos

La 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.

Conflicto de interés

Los autores declaran que no tienen conflicto de intereses en la publicación de sus hallazgos en este artículo, el cual se creó para fines académicos y científicos.

5. Referencias

- Altun, S., & Tokdemir, V. (2017). Modification with Melamine Formaldehyde and Melimine-Urea Formaldehyde Resin to Improve the Physical and Mechanical Properties of Wood. *BioResources*, 12(1):586-596. <https://doi.org/10.15376/biores.12.1.586-596>
- Bachtiar, E. V., Sanabria, S. J., Mittig, J. P., & Niemz, P. (2017). Moisture-dependent elastic characteristics of walnut and cherry wood by means of mechanical and ultrasonic test incorporating three different ultrasound data evaluation techniques. *Wood Science and Technology*, 51:47-67. <https://doi.org/10.1007/s00226-016-0851-z>
- Bhkari, N. M., Chen, L. W., Nordin, M. S. Zainal, N. S. Za'ba, N. I. L., & Ahmad, Z. (2023). Mechanical Properties of Laminated Veneer Lumber (LVL) Fabricated from Three Malaysian Hardwood Species. *International Journal of Integrated Engineering*, 15(1):377-390. <https://doi.org/10.30880/ijie.2023.15.01.034>
- Brancheriau, L., & Bailleres, B. (2002). Natural vibration analysis of clear wooden beams: a theoretical review. *Wood Science and Technology*, 36(4):347-365. <https://doi.org/10.1007/s00226-002-0143-7>
- 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>
- Daoui, A., Descamps, C., Marchal, R., & Zerizer, A. (2011). Influence of veneer quality on beech LVL mechanical properties. *Maderas: Ciencia y Tecnología*, 13(1):69-83. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2011000100007>
- Hussin, M. H., Latif, N. H. A., Hamidon, T. S., Idris, N. N., Hashim, R., Appaturi, J. N., Brosse, N., Ziegler-Devin, I., Chrusiel, L., Fatriasari, W., Syamani, F. A., Iswanto, A. H., Hua, L. S., Al Edrus, S. S. A. O., Lum, W. C., Antov, P., Savov, V., Lubis, M. A. R., Kristak, L., Reh, R., & Sedliáčik, J. (2022). Latest advancements in high-performance bio-based wood adhesives: A critical review. *Journal of Materials Research and Technology*, 21:3909-3946. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.10.156>
- Icimoto, F. H., Calil, N., C., Ferro, F. S., Borges de M., L., Christoforo, A. L., Rocco L., F. A., & Calil J., C. (2016). Influence of Lamellar Thickness on Strength and Stiffness of Glued Laminated Timber Beams of *Pinus oocarpa*. *International Journal of Materials Engineering*, 6(2):51-55. <https://doi.org/10.5923/j.ijme.20160602.05>

- 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 and mechanical tests. Geneva, Switzerland. <https://www.iso.org/standard/60063.html>
- 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. Geneva, Switzerland. <https://www.iso.org/standard/60064.html>
- Kandler, G., Füssl, J., Serrano, E., & Eberhardsteiner, J. (2015). Effective stiffness prediction of GLT beams based on stiffness distributions of individual lamellas. *Wood Science and Technology*, 49(6):1101-1121. <https://doi.org/10.1007/s00226-015-0745-5>
- Kallarackal, J., & Ramírez, F. (2024). Wood Density Variations. In: *Wood Density*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-61030-1_4
- Keskin, H. (2009). Impact of impregnation chemical on the bending strength of solid and laminated wood materials. *Materials and Design*, 30(3):796-803. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.05.043>
- Komariah, R. N., Hadi, Y. S., Massijaya, M. Y., & Suryana, J. (2015). Physical-Mechanical Properties of Glued Laminated Timber Made from Tropical Small-Diameter Logs Grown in Indonesia. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, 43(2):156-167. <https://doi.org/10.5658/WOOD.2015.43.2.156>
- Koutsianitis, D., Ninikas, K., Mitani, A., Ntalos, G., Miltiadis, N., Vasilios, A., Taghiyari, H. R., & Papadopoulos, A. N. (2021). Thermal Transmittance, Dimensional Stability, and Mechanical Properties of a Three-Layer Laminated Wood Made from Fir and Meranti and Its Potential Application for Wood-Frame Windows. *Coatings*, 11:304. <https://doi.org/10.3390/coatings11030304>
- Lee, I., & Oh, W. (2023). Flexural Modulus of Larch Boards Laminated by Adhesives with Reinforcing Material. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, 51(1):14-22. <https://doi.org/10.5658/WOOD.2023.51.1.14>
- López, Y., F. N., Polanco, T., C., & Bermúdez, E. J. C. (2013). Caracterización mecánica estructural para veinte combinaciones de madera laminada encolada. *Colombia Forestal*, 16(2):138-157. <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/colfor/article/view/3918/6982>
- Macedo-Alquicira, I., & Sotomayor-Castellanos, J. R. (2021). Densidad, velocidad del ultrasonido y módulo dinámico de madera sólida y laminada de *Pinus pseudostrabus*. *Madera y Bosques*, 27(3):1-14. <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2732235>
- Naruse, K. (2003). Estimation of shear moduli of wood by quasi-simple shear tests. *Journal of Wood Science*, 49(6):479-484. <http://dx.doi.org/10.1007/s10086-003-0515-0>

- 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>
- Park, S., Jeong, B., & Park, B-D. A. (2021). Comparison of Adhesion Behavior of Urea-Formaldehyde Resins with Melamine-Urea-Formaldehyde Resins in Bonding Wood. *Forests*, 12:037. <https://doi.org/10.3390/f12081037>
- Slabohm, M., & Militz, H. (2024). Bonding performance and surface characterization of cold-bonded acetylated beech (*Fagus sylvatica* L.) laminated veneer lumber. *Scientific Reports*, 14:4083. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-48224-z>
- Sotomayor-Castellanos, J. R. (2020). Efecto del preservado de la madera con boro sobre el módulo dinámico (evaluación por medio de ultrasonido). *Revista Científica*, 24(1):67-76. <https://doi.org/10.46842/ipn.cien.v24n1a08>
- Sotomayor-Castellanos J. R., & Correa-Jurado, S. (2016). Retención de sales de boro en la madera y su efecto en el módulo de elasticidad dinámico. *Revista Científica*, 24(1):67-76. <https://doi.org/10.14483/10.14483/udistrital.jour.RC.2016.24.a9>
- Sotomayor-Castellanos, J. R., García-Mariscal, J. L., Hernández-Maldonado, S. A., Moya-Lara, C. E., & Olguín-Cerón, J. B. (2011). Dispositivo de usos múltiples para pruebas no destructivas en madera y materiales compuestos de madera. Ultrasonido, ondas de esfuerzo y vibraciones transversales. *Investigación e Ingeniería de la Madera*, 7(3):20-33. <https://goo.su/zzOisN>
- Sotomayor-Castellanos, J. R., Macedo-Alquicira, I., & Chávez-García, H. L. (2020). Variabilidad en las densidades, las velocidades del ultrasonido y los módulos dinámicos en tres maderas mexicanas y tres maderas japonesas. *Ingeniería y Desarrollo*, 38(2):282-299. <https://doi.org/10.14482/inde.38.2.624.15>
- StatPoint Technologies. (2010). STATGRAPHICS® Centurion XVI User Manual. 305 p. <https://www.statgraphics.net/wp-content/uploads/2015/03/Centurion-XVI-Manual-Principal.pdf>

2024 TECNOCENCIA CHIHUAHUA.

Esta obra está bajo la Licencia Creative Commons Atribución No Comercial 4.0 Internacional.



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>