

Investigación original

Efecto de la laminación sobre el módulo de rigidez dinámico en madera sólida y laminada de *Fagus crenata* Blume mediante vibraciones torsionalesJavier Ramón Sotomayor Castellanos Javier.sotomayor@umich.mxUniversidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
MéxicoFiras Hawasly hawasly_firas@iwt.akita-pu.ac.jpUniversidad Prefectoral de Akita
JapónKoji Adachi kadachi@iwt.akita-pu.ac.jpUniversidad Prefectoral de Akita
JapónSonia Correa Jurado 0213761h@umich.mxUniversidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
México

Historial del artículo:

Recibido Mayo 18, 2025. Aceptado Mayo 20, 2026. Publicado Junio 30, 2026.

Cómo citar: Sotomayor Castellanos, J. R.; Hawasly, F.; Adachi, K. & Correa Jurado, S. (2026). Efecto de la laminación sobre el módulo de rigidez dinámico en madera sólida y laminada de *Fagus crenata* Blume mediante vibraciones torsionales. *Ceiba*, 59 (1), 111-119. <https://doi.org/10.5377/y231fw76>

Resumen. El presente estudio evalúa el efecto de la laminación sobre la densidad y el módulo de rigidez dinámico en torsión de madera de *Fagus crenata* Blume, mediante ensayos de vibraciones torsionales en probetas de dimensiones reducidas. Se analizaron dos configuraciones del material: madera sólida y madera laminada, esta última fabricada a partir de láminas delgadas con orientación paralela a la dirección longitudinal y unidas mediante adhesivo melamina-urea-formaldehído. La densidad se determinó conforme a la norma ISO 13061-2 y el módulo de rigidez se estimó a partir de la frecuencia natural de vibración, siguiendo el método de excitación por impulso. Los resultados mostraron un incremento en la densidad de la madera laminada respecto a la madera sólida, atribuible al proceso de compactación y a la incorporación de adhesivo. Sin embargo, no se observaron diferencias estadísticamente significativas en el módulo de rigidez entre ambas configuraciones ($P > 0.05$), aunque se identificó una ligera tendencia al aumento en el material laminado, acompañada de una reducción en la variabilidad. El análisis de la relación entre densidad y módulo de rigidez evidenció coherencia con tendencias reportadas en la literatura, confirmando la dependencia del comportamiento mecánico respecto a la estructura interna del material. Los resultados indican que la laminación modifica la distribución estructural y la homogeneidad del material, sin inducir necesariamente un incremento significativo en la rigidez, lo cual resalta la importancia de considerar la eficiencia de las interfaces adhesivas en la transferencia de esfuerzos cortantes. Estos hallazgos aportan evidencia experimental relevante para la comprensión del comportamiento torsional de configuraciones laminadas homogéneas.

Palabras clave: anisotropía, ensayos no destructivos, frecuencia natural, madera reconstituida, vibración torsional

Effect of lamination on the dynamic shear modulus of solid and laminated *Fagus crenata* Blume wood by torsional vibration testing

Abstract: This study evaluates the effect of lamination on the density and dynamic shear modulus (G) in torsion of *Fagus crenata* Blume wood using torsional vibration testing on small specimens. Two material conditions were analyzed: solid wood and laminated wood, the latter manufactured from thin layers oriented parallel to the longitudinal direction and bonded with melamine–urea–formaldehyde adhesive. Density was determined according to ISO 13061-2, and the shear modulus was estimated from the natural frequency of vibration using the impulse excitation method. The results showed an increase in density in laminated wood compared to solid wood, attributed to material densification and adhesive incorporation during manufacturing. However, no statistically significant differences were found in the shear modulus between both conditions ($P > 0.05$), although a slight increase and reduced variability were observed in laminated wood. The relationship between density and shear modulus was consistent with trends reported in the literature, confirming the dependence of mechanical behavior on the internal structure of wood. These findings indicate that lamination modifies the structural distribution and homogeneity of the material without necessarily producing a significant increase in stiffness, highlighting the role of adhesive interfaces in shear stress transfer. The results provide relevant experimental evidence for understanding the torsional behavior of homogeneous laminated wood configurations.

Keywords: anisotropy, engineered wood, natural frequency, non-destructive testing, torsional vibration

Introducción

La madera laminada constituye una tecnología orientada a reducir la variabilidad inherente de las propiedades mecánicas de la madera aserrada mediante la redistribución y homogenización de sus elementos estructurales (Bartolucci et al., 2020; He et al., 2023). En este contexto, el módulo de rigidez en torsión representa un parámetro fundamental para describir la respuesta del material frente a esfuerzos cortantes, estando gobernado por la densidad, la organización anatómica y la orientación de las microfibrillas en la pared celular (Miyoshi et al., 2018; Emmerich et al., 2019).

La determinación experimental del módulo de rigidez ha sido abordada mediante diferentes metodologías mecánicas, evidenciando su sensibilidad a las condiciones de ensayo y a la anisotropía del material (Bilko et al., 2021). Desde un punto de vista físico, aunque existe una correlación positiva entre densidad y módulo de rigidez, esta relación no es estrictamente proporcional, ya que depende de factores estructurales que afectan la transferencia de esfuerzos a nivel microscópico (Liu et al., 2019; Arriaga et al., 2023).

En métodos dinámicos, como los ensayos de vibraciones torsionales, el módulo de rigidez se determina a partir de la frecuencia natural de oscilación del sistema, lo que permite estimar propiedades elásticas dinámicas mediante métodos no destructivos con alta sensibilidad a cambios estructurales internos (Krüger & Wagenführ, 2020; Wang et al., 2023). Este enfoque ha sido aplicado tanto en probetas de pequeñas dimensiones como en elementos estructurales laminados, donde el análisis vibracional permite evaluar el comportamiento dinámico y la rigidez

del material (Abramowicz et al., 2024). En probetas de pequeñas dimensiones, la reducción de defectos locales y la mayor uniformidad geométrica contribuyen a mejorar la repetibilidad y precisión de las mediciones (Boccacci et al., 2022; Huang et al., 2021).

La madera de *Fagus crenata* Blume es una especie ampliamente utilizada en la fabricación de mobiliario, elementos estructurales y productos de alto valor añadido debido a su densidad media-alta, estabilidad dimensional y comportamiento mecánico favorable (Ida et al., 2023; Arriaga et al., 2023). Desde una perspectiva de ingeniería de materiales, el conocimiento del módulo de rigidez en torsión resulta fundamental para el diseño y dimensionamiento de componentes sometidos a esfuerzos cortantes, ya que este parámetro controla la resistencia a deformaciones angulares y la integridad estructural del material bajo sollicitaciones complejas (Ostapska & Malo, 2021; Wang et al., 2023).

En maderas de estructura difusa como *F. crenata*, el módulo de rigidez está fuertemente influenciado por la distribución de la densidad, la orientación de las fibras y la anisotropía inherente del material, lo que genera variabilidad en su respuesta mecánica incluso dentro de una misma especie (Liu et al., 2019; Emmerich et al., 2019). Este comportamiento anisotrópico ha sido ampliamente documentado en función de la dirección de la fibra y del contenido de humedad, los cuales afectan de manera significativa las propiedades elásticas de la madera (Fu et al., 2021). En este contexto, la caracterización precisa del módulo de rigidez mediante métodos dinámicos adquiere relevancia para aplicaciones estructurales y de ingeniería avanzada, donde se requieren materiales con comportamiento mecánico predecible y confiable.

La determinación del módulo dinámico mediante vibraciones en torsión en madera de *F. crenata* ha sido abordada en estudios previos, principalmente en madera sólida y en configuraciones multimateriales (Macedo et al., 2022; Wang et al., 2023). Sin embargo, estos trabajos no han analizado de manera específica el comportamiento de configuraciones laminadas homogéneas bajo sollicitaciones torsionales, particularmente en sistemas donde las láminas presentan orientación paralela y continuidad estructural controlada. Esta limitación impide comprender con precisión el efecto de la laminación sobre la relación entre densidad y módulo de rigidez en condiciones dinámicas.

Desde una perspectiva de ciencia de materiales, la laminación introduce una arquitectura estructural distinta, en la cual la presencia de interfaces adhesivas y la redistribución de defectos pueden modificar los mecanismos de transferencia de esfuerzos cortantes a diferentes escalas (Brandner et al., 2016; Huang et al., 2021). En este sentido, el efecto de la laminación sobre el módulo de rigidez no puede asumirse como un incremento directo, sino que requiere una evaluación experimental específica que considere, tanto la homogeneización del material, como las posibles discontinuidades mecánicas inducidas por el proceso de fabricación.

La configuración propuesta en este estudio, basada en la superposición de láminas de pequeño espesor con orientación paralela a la dirección longitudinal, constituye un sistema estructural simplificado que permite evaluar el efecto de la laminación bajo condiciones controladas. A diferencia de otros productos de madera reconstituida que incorporan múltiples direcciones de fibra o componentes heterogéneos, esta configuración busca aislar el efecto de la homogeneización del material sobre el comportamiento en torsión (Huang et al., 2021).

Desde el punto de vista mecánico, esta disposición favorece la continuidad en la dirección principal de carga, pero introduce interfaces adhesivas que pueden alterar la continuidad mecánica entre láminas. En consecuencia, el comportamiento del material resultante depende de un balance entre la reducción de la variabilidad estructural y la posible disminución de la eficiencia mecánica asociada a dichas interfaces, lo cual justifica la necesidad de su evaluación experimental específica.

En este contexto, la presente investigación se plantea con un carácter exploratorio, orientado a identificar tendencias en el comportamiento del módulo de rigidez en torsión en madera sólida y laminada de *F. crenata* bajo condiciones experimentales controladas. Este enfoque responde al tamaño reducido de la muestra y a la naturaleza del diseño experimental, que privilegia el control de

variables y la repetibilidad de las mediciones sobre la representatividad estadística a gran escala.

Desde una perspectiva metodológica, los estudios exploratorios permiten generar evidencia preliminar sobre fenómenos complejos en materiales anisotrópicos como la madera, particularmente cuando se evalúan configuraciones estructurales no ampliamente documentadas. La naturaleza anisotrópica de la madera implica una fuerte dependencia direccional de sus propiedades mecánicas, así como una elevada variabilidad estructural, lo que dificulta su caracterización completa bajo un único esquema experimental (Liu et al., 2019; Ozyhar et al., 2012). En este contexto, el uso de configuraciones simplificadas y tamaños muestrales controlados constituye una estrategia válida para aislar efectos específicos y establecer tendencias iniciales del comportamiento mecánico. En consecuencia, los resultados obtenidos deben interpretarse como indicativos de tendencias, cuya validación requerirá estudios posteriores con mayor tamaño muestral, diversidad estructural y condiciones de ensayo más representativas (Arriaga et al., 2023; He et al., 2023).

El estudio se fundamenta en la hipótesis de que la laminación de madera sólida hacia una configuración homogénea puede modificar el módulo de rigidez en torsión como resultado de la interacción entre la homogeneización estructural y la presencia de interfaces adhesivas. En este sentido, se plantea la hipótesis de que la laminación no necesariamente induce un incremento directo del módulo de rigidez, sino que puede generar cambios en su magnitud y en su variabilidad, dependiendo de la eficiencia en la transferencia de esfuerzos cortantes entre láminas.

Para verificar esta propuesta, el objetivo de la investigación fue evaluar el efecto de la laminación sobre la densidad y el módulo de rigidez dinámico en torsión de madera de *F. crenata*, mediante ensayos de vibraciones torsionales en probetas de dimensiones reducidas bajo condiciones experimentales controladas. Asimismo, se buscó analizar la relación entre la densidad y el módulo de rigidez, con el fin de identificar posibles modificaciones en el comportamiento mecánico asociadas a la transformación del material de estado sólido a laminado.

El alcance del presente estudio se limita a la evaluación experimental de madera sólida y laminada de *F. crenata*, utilizando probetas de dimensiones reducidas y material libre de defectos visibles. En este contexto, los resultados permiten establecer una base experimental para comprender el efecto de la laminación sobre el módulo de rigidez dinámico, aportando elementos para futuras investigaciones orientadas a la validación a escala estructural y a la optimización de configuraciones

laminadas. Asimismo, el estudio contribuye a la caracterización del comportamiento torsional en sistemas homogéneos, evidenciando la relación entre densidad, rigidez y variabilidad estructural en madera reconstituida.

Materiales y métodos

Materiales

El material de estudio consistió en dos grupos de probetas de *F. crenata*: madera sólida y madera laminada. El primer grupo estuvo conformado por seis probetas de madera sólida con dimensiones de 21 mm × 150 mm × 100 mm, respectivamente según las direcciones radial, tangencial y longitudinal del material. El segundo grupo consistió en seis probetas de madera laminada, fabricadas mediante la superposición de 21 láminas de 1 mm de espesor, dispuestas con orientación paralela a la dirección longitudinal. Las dimensiones finales de las probetas laminadas fueron equivalentes a las de las probetas de madera sólida.

Para la fabricación del material laminado se utilizó un adhesivo de melamina-urea-formaldehído, aplicado con un gramaje de 200 g·m⁻². El ensamblaje se realizó mediante prensado térmico a una temperatura de 110 °C y una presión de 10 kg·cm⁻², asegurando la consolidación del material. El material utilizado corresponde al mismo lote previamente caracterizado mediante técnicas ultrasónicas (Sotomayor et al., 2024), lo que garantiza la consistencia del origen y las condiciones del material evaluado.

Métodos

El contenido de humedad se determinó de acuerdo con la norma ISO 13061-1 (International Organization for

Standardization, 2014a), mediante la relación entre la masa húmeda y la masa seca de las probetas, expresada en porcentaje respecto a la masa seca. Las probetas fueron secadas en estufa hasta alcanzar masa constante, asegurando la eliminación del contenido de humedad libre. La densidad se calculó conforme a la norma ISO 13061-2 (International Organization for Standardization, 2014b), mediante la relación entre la masa y el volumen de cada probeta en el estado de ensayo, considerando sus dimensiones geométricas medidas con precisión.

Los ensayos dinámicos se realizaron siguiendo el protocolo descrito por Correa et al. (2024), basado en el método de excitación por impulso torsional. En cada prueba, las probetas fueron sometidas a una excitación torsional mediante la aplicación de un impulso mecánico controlado, generando una vibración libre, cuya respuesta fue registrada para determinar la frecuencia natural de oscilación (Figura 1).

La señal de vibración fue adquirida y analizada para identificar la frecuencia fundamental correspondiente al modo torsional. Para cada probeta se realizaron dos mediciones independientes, con el fin de evaluar la repetibilidad del ensayo y minimizar la influencia de variaciones experimentales. Los valores obtenidos fueron promediados para el cálculo de los parámetros estadísticos del módulo de rigidez.

Las pruebas se llevaron a cabo considerando los lineamientos de la norma ASTM C1259-15 (American Society for Testing and Materials, 2015a), adaptados a las condiciones experimentales del presente estudio. Mediante el empleo de un aparato Grindosonic® modelo MKS, se registró el movimiento de la probeta en una posición simétrica respecto al punto de impacto. La lectura del sensor

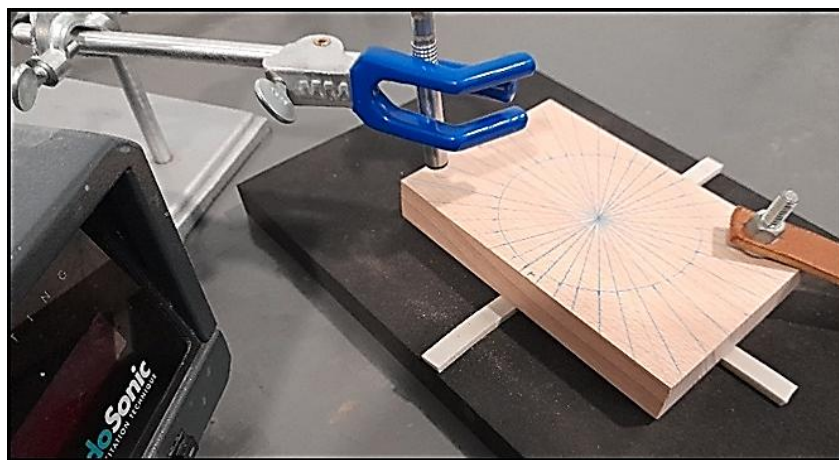


Figura 1. Configuración experimental del ensayo de vibraciones torsionales para la determinación del módulo de rigidez en probetas de madera de *F. crenata*.

piezo-eléctrico de movimiento se transforma en una señal eléctrica, la cual, a su vez, es convertida en la frecuencia natural del sistema, con una precisión de lectura de 0.005 %. El módulo de rigidez se calculó de acuerdo con la norma ASTM E1876-15 (American Society for Testing and Materials, 2015b) utilizando la ecuación [1]:

$$[1] \quad G = \frac{4 l m f^2}{b t} \left[\frac{B}{(1 + A)} \right]$$

Donde:

G = Módulo de rigidez (MN·m⁻²)

f = Frecuencia natural (Hz)

m = Masa de la probeta (g)

l = Largo de la probeta (dirección longitudinal) (m)

t = Espesor de la probeta (dirección radial) (m)

b = Ancho de la probeta (dirección tangencial) (m)

A, B = Factores de ajuste geométrico

Diseño experimental

La unidad experimental estuvo constituida por dos conjuntos de probetas: madera en estado sólido y madera en estado laminado. El tratamiento experimental correspondió a la transformación de la madera sólida en madera laminada. La densidad (ρ) y el módulo de rigidez (G) de la madera sólida se consideraron como variables independientes, mientras que los valores correspondientes en la madera laminada se analizaron como variables dependientes. El contenido de humedad de la madera (CH) se mantuvo como una variable controlada y de referencia durante el desarrollo de los ensayos.

Se determinaron la media aritmética (μ), la desviación estándar (σ) y el coeficiente de variación ($CV = \sigma/\mu$). Además, se llevaron a cabo pruebas de normalidad (Kolmogorov-Smirnov) mediante el cálculo del sesgo (S) y el apuntamiento (A). El criterio para aceptar una distribución normal consistió en los valores del sesgo y del apuntamiento dentro del rango $-2 < S < 2$ y $-2 < A < 2$. Tras confirmar la normalidad de las muestras y verificar las varianzas mediante la prueba de Levene, se llevó a cabo un análisis de varianza de muestras independientes para un nivel de confianza del 95 %. El criterio para aceptar una diferencia estadísticamente significativa se estableció en los

valores de $P_{(\alpha=0.05)} < 0.05$. Se verificó la hipótesis nula $H_0: \mu_{\text{sólida}} - \mu_{\text{laminada}} = 0$ y se contrastó con la hipótesis alterna $H_A: \mu_{\text{sólida}} - \mu_{\text{laminada}} \neq 0$.

Los hallazgos de este estudio se ubicaron en relación con la tendencia de datos del módulo de rigidez de maderas documentada en la bibliografía (Macedo et al., 2022; Correa et al., 2024; Sotomayor et al., 2023; Sotomayor, 2024). Se calculó la regresión lineal $y = ax + b$ y su coeficiente de determinación (R^2) entre el módulo de rigidez y de la densidad. Para corroborar la cantidad de muestras requeridas para el análisis, se determinó el tamaño de la muestra requerido (número de probetas) para la validación de las pruebas estadísticas. Este parámetro se calculó a partir de la expresión del error de estimación asociada a intervalos de confianza, la cual permite determinar el tamaño mínimo de muestra requerido en función del nivel de confianza, la desviación estándar y el error admisible (Bonett, 2002) ecuación [2]:

$$[2] \quad n = \left(Z \frac{\sigma}{e} \right)^2$$

Donde:

n = Tamaño de muestra

σ = Desviación estándar

e = Error admisible (0.05)

Z = Valor de la distribución normal (para e = 0.05)

Resultados

El número de mediciones realizadas en este estudio correspondió a doce determinaciones en seis probetas, considerando dos mediciones por probeta. Si bien este tamaño muestral es inferior al reportado en algunos estudios previos sobre vibraciones torsionales en madera de *F. crenata* (Macedo et al., 2022; Sotomayor et al., 2023; Sotomayor, 2024), su suficiencia fue evaluada mediante el cálculo del tamaño de muestra requerido para un error de estimación de 0.05. Este análisis indicó que son necesarias al menos cuatro probetas para la madera sólida y dos para la madera laminada, lo cual respalda la adecuación del tamaño muestral empleado en el presente estudio (Figura 2).

Los resultados obtenidos en las pruebas dinámicas mostraron una baja dispersión en las mediciones, lo cual se

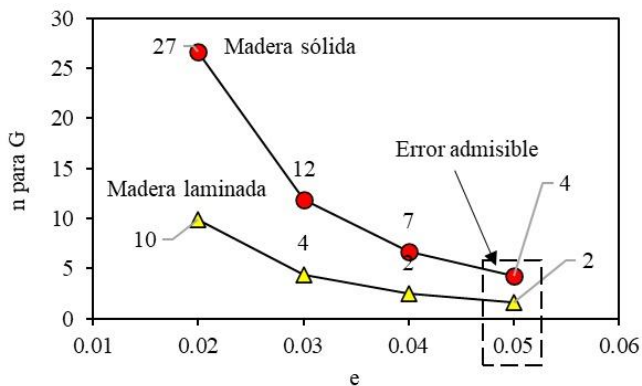


Figura 2. Determinación del tamaño de muestra (n) requerido en función del error admisible (e) para el análisis del módulo de rigidez (G).

Tabla 1. Resultados del contenido de humedad, de la densidad y del módulo de rigidez de la madera sólida y laminada de *F. crenata*.

	CH (%)	ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	G ($\text{MN}\cdot\text{m}^{-2}$)
Madera sólida			
μ	9	695	1,239
σ	0.43	7	64
CV (%)	5	1	5
Madera laminada			
μ	9	807	1,273
σ	0.34	11	40
CV (%)	5	1	3

Nota: CH = Contenido de humedad; ρ = Densidad; G = Módulo de rigidez; μ = Media; σ = Desviación estándar; CV = Coeficiente de variación.

refleja en los valores del coeficiente de variación presentados en la Tabla 1. Esta consistencia puede atribuirse al uso de probetas de pequeñas dimensiones y a la aplicación de un método dinámico no destructivo, condiciones que favorecen la repetibilidad de las mediciones en materiales lignocelulósicos (Bocacci et al., 2023). Este comportamiento es consistente con lo reportado en la literatura, donde se ha documentado que la variabilidad de las propiedades mecánicas en la madera depende tanto de factores estructurales como de las condiciones de ensayo, pudiendo reducirse bajo configuraciones experimentales controladas (Tapia & Aicher, 2020). En este contexto, el conjunto de datos obtenidos se considera adecuado para identificar tendencias en el comportamiento del módulo de rigidez bajo las condiciones experimentales evaluadas.

Los valores de sesgo y apuntamiento de la densidad y del módulo de rigidez en la madera sólida y laminada se encuentran dentro del intervalo $-2 < S < 2$ y $-2 < A < 2$, lo que indica que las muestras presentan una

distribución normal (Tabla 2). Asimismo, los resultados de la prueba de Levene muestran que se cumple el supuesto de homogeneidad de varianzas para ambas variables. El análisis de varianza indicó diferencias estadísticamente significativas en la densidad ($P_{(\alpha=0.05)} < 0.05$), pero no en el módulo de rigidez ($P_{(\alpha=0.05)} > 0.05$).

El contenido de humedad promedio de las probetas fue de 9 % en ambos grupos evaluados (Tabla 1), manteniéndose constante entre la madera sólida y la madera laminada. Asimismo, los valores del coeficiente de variación fueron equivalentes, lo que indica una baja dispersión en este parámetro. Estas condiciones permiten considerar que el contenido de humedad se mantuvo controlado durante los ensayos y que su influencia sobre las propiedades mecánicas evaluadas fue comparable entre ambos materiales. Este control resulta relevante, dado que el contenido de humedad influye directamente en las propiedades elásticas dinámicas de la madera, afectando la rigidez y la respuesta vibracional del material (Carreira et al., 2022).

El análisis comparativo mostró un incremento en la densidad de la madera laminada respecto a la madera sólida (Tabla 1). Este comportamiento puede atribuirse al proceso de fabricación, en el cual la aplicación de presión y la incorporación de adhesivo favorecen una mayor compactación del material. No obstante, el coeficiente de variación de la densidad se mantiene constante en ambos casos, lo que indica que la variabilidad relativa entre las muestras no se ve afectada por el proceso de laminación.

Desde una perspectiva de ciencia de materiales, los resultados sugieren que el proceso de laminación puede contribuir a una mayor homogeneidad estructural del material, en concordancia con lo reportado para productos de madera reconstituida (He et al., 2023). No obstante, este comportamiento debe interpretarse con cautela, ya que los mecanismos internos asociados —como la redistribución de defectos o la compactación celular— no fueron evaluados directamente en este estudio. En este sentido, la madera laminada puede considerarse un material con potencial para aplicaciones donde se requiera uniformidad en propiedades mecánicas.

El análisis estadístico indicó que no existen diferencias significativas en el módulo de rigidez entre la madera sólida y la madera laminada ($P_{(\alpha=0.05)} = 0.145$) (Tabla 2). No obstante, la madera laminada presentó un incremento del 2.7 % en el módulo de rigidez respecto a la madera sólida (Tabla 1). Dado que esta diferencia no es estadísticamente significativa, este resultado debe interpretarse como una tendencia y no como una mejora concluyente del comportamiento mecánico. Asimismo, se

Tabla 2. Resultados del análisis estadístico.

	S	A	Ver-var	Anova
	[-2, +2]	[-2, +2]	$P_{(\alpha=0.05)}$	$P_{(\alpha=0.05)}$
Densidad				
Madera sólida	0.795	-1.099	0.441	< 0.001*
Madera laminada	0.152	-0.227		
Módulo de rigidez				
Madera sólida	0.740	-1.065	0.481	0.145
Madera laminada	-0.886	0.145		

Nota: S = Sesgo; A = Apuntamiento; Ver-var = Prueba de Levene para igualdad de varianzas; Anova = Análisis de varianza; * = Existe una diferencia estadísticamente significativa con un nivel del 95 % de confianza.

observó una reducción en la variabilidad del módulo de rigidez en la madera laminada (Tabla 1), lo que sugiere un posible efecto de homogenización asociado al proceso de laminación. Estos resultados son consistentes con lo reportado en productos de madera reconstituida (Ramesh et al., 2022; He et al., 2023).

Discusión

Los valores del módulo de rigidez obtenidos para la madera sólida y laminada se ubican dentro del rango reportado en la literatura (Tabla 3) para materiales con densidades similares como se muestra en la Figura 3. Esta tendencia es consistente con la relación empírica entre la densidad y el módulo de rigidez, ampliamente documentada en diferentes especies de madera. Para esta comparación se emplearon datos provenientes de estudios con metodologías basadas en ensayos dinámicos de torsión, comparables con el enfoque experimental del presente trabajo (Macedo et al., 2022; Sotomayor et al., 2023; Sotomayor, 2024). En este sentido, los resultados obtenidos no evidencian un incremento significativo del módulo de rigidez asociado al proceso de laminación, lo que implica una aceptación parcial de la hipótesis planteada, en términos de modificación del comportamiento mecánico más que de su mejora directa.

Estos resultados son consistentes con los reportados por Sotomayor et al. (2023) para la relación entre la densidad y el módulo de rigidez en especies como *P. pseudostrobus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla*. En dicho estudio se estableció una correlación lineal del tipo $G = 0.98 \rho + 346$, con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.98$. Asimismo, Sotomayor (2024) reporta una relación $G = 1.29 \rho + 238$ ($R^2 = 0.70$) para un conjunto de maderas japonesas y mexicanas, incluyendo *F. crenata*, lo cual respalda la tendencia observada en la presente investigación.

Considerando la configuración del material laminado evaluado en este estudio, resulta complejo establecer comparaciones directas con otros materiales reportados en la literatura. Macedo et al. (2022) reportan

valores del módulo de rigidez dinámico para madera de *F. crenata*, determinados mediante una metodología similar a la empleada en el presente trabajo, con un valor de $998 \text{ MN}\cdot\text{m}^{-2}$, lo que representa aproximadamente un 19 % inferior al obtenido en esta investigación para la madera sólida. Por su parte, el módulo de rigidez de la madera laminada evaluada en este estudio supera en aproximadamente un 11 % al reportado para un multimaterial basado en *F. crenata* ($1,130 \text{ MN}\cdot\text{m}^{-2}$) en el mismo trabajo citado.

El método de vibraciones torsionales empleado en este estudio permitió estimar el módulo dinámico de la madera con un alto nivel de consistencia en probetas de dimensiones reducidas. No obstante, las diferencias observadas entre los valores obtenidos y los reportados en la literatura, pueden atribuirse a la variabilidad inherente de la madera, así como a factores como la densidad, la estructura anatómica y el contenido de humedad, los cuales influyen directamente en el comportamiento dinámico del material (Liu et al., 2019; Miyoshi et al., 2018; Ozyhar et al., 2012). Asimismo, las configuraciones estructurales específicas de los materiales reconstituidos pueden modificar la respuesta mecánica observada, particularmente en sistemas laminados donde la interacción entre capas y la calidad de las interfaces influyen en la rigidez global del material (Arriaga et al., 2023; Osuna-Sequera et al., 2023; Romero & Odenbreit, 2023).

Los resultados obtenidos a partir de ensayos en probetas de dimensiones reducidas permiten identificar tendencias en el comportamiento mecánico del material bajo condiciones controladas de laboratorio. Sin embargo, la extrapolación de estos resultados a aplicaciones estructurales o industriales debe realizarse con cautela, ya que factores como la escala del material, la presencia de defectos y las condiciones de servicio pueden influir significativamente en su desempeño mecánico (Ding et al., 2022; Wang et al., 2024). En este contexto, la predicción del comportamiento mecánico de materiales lignocelulósicos laminados requiere considerar no solo la densidad, sino también la arquitectura interna del material

Tabla 3. Densidad y módulo de rigidez de maderas. Datos documentados en la bibliografía.a.

Especie/material	ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	G ($\text{MN}\cdot\text{m}^{-2}$)	Referencia
<i>Fagus crenata</i>	617	998	Macedo <i>et al.</i> , 2022
<i>Pinus pseudostrobus</i>	587	906	Sotomayor <i>et al.</i> , 2023
<i>Tabebuia rosea</i>	565	915	Sotomayor <i>et al.</i> , 2023
<i>Quercus scytophylla</i>	735	1,068	Sotomayor <i>et al.</i> , 2023
<i>Tabebuia rosea</i>	774	1,560	Correa <i>et al.</i> , 2024
<i>Quercus scytophylla</i>	913	1,289	Correa <i>et al.</i> , 2024
<i>Paulownia tomentosa</i>	266	456	Sotomayor, 2024
<i>Cryptomeria japonica</i>	421	742	Sotomayor, 2024
<i>Fagus crenata</i>	629	1,056	Sotomayor, 2024

Nota: ρ = densidad; G = Módulo de rigidez

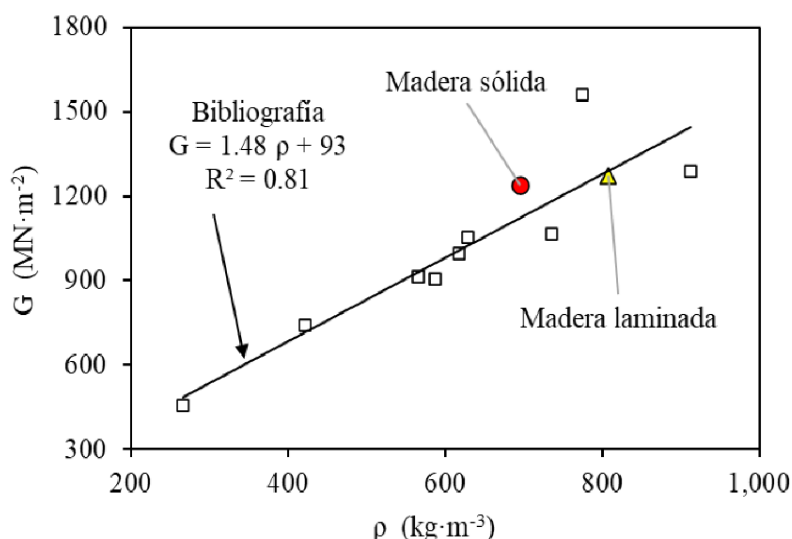


Figura 3. Relación entre la densidad (ρ) y el módulo de rigidez (G) en madera sólida y laminada de *F. crenata*, en comparación con datos reportados en Macedo et al. (2022), Sotomayor et al. (2023) y Sotomayor (2024).

y la calidad de las interfaces adhesivas.

Conclusiones

Los resultados obtenidos en el presente estudio permiten aceptar parcialmente la hipótesis planteada y, en correspondencia, indican que se alcanza el objetivo de la investigación, al evidenciar que la laminación de la madera modifica la estructura interna y la variabilidad del material, sin inducir cambios estadísticamente significativos en el módulo de rigidez en torsión bajo las condiciones experimentales evaluadas. El incremento en la densidad de la madera laminada respecto a la madera sólida, junto con la reducción del coeficiente de variación del módulo de rigidez, confirma un efecto de homogeneización estructural asociado al proceso de laminación, mientras que la ausencia de diferencias significativas en el módulo de rigidez, indica que la eficiencia mecánica de las interfaces adhesivas no

genera un incremento sustancial en la rigidez cortante del material a escala global.

En términos metodológicos, el uso de probetas de dimensiones reducidas y libres de defectos visibles permitió minimizar la influencia de heterogeneidades estructurales inherentes a la madera, favoreciendo una mayor precisión en la estimación del módulo de rigidez en torsión a nivel de muestra. Asimismo, la orientación controlada de las probetas en las direcciones ortotrópicas del material contribuyó a una evaluación consistente de sus propiedades mecánicas, reduciendo la dispersión experimental y mejorando la repetibilidad de las mediciones. No obstante, esta estrategia experimental implica una limitación en términos de inferencia estadística y representatividad estructural, dado que el tamaño muestral empleado restringe la extrapolación de los resultados a poblaciones más amplias o a condiciones de servicio reales.

En cuanto al comportamiento mecánico, los resultados muestran que la madera laminada presenta un módulo de rigidez ligeramente superior al de la madera sólida; sin embargo, dado que esta diferencia no es estadísticamente significativa, debe interpretarse como una tendencia asociada al proceso de laminación dentro del contexto exploratorio del estudio, más que como una mejora concluyente del material. Esta respuesta es consistente con la relación física entre densidad y módulo de rigidez reportada en la literatura, así como con el efecto combinado de la compactación del material y la presencia de interfaces adhesivas, las cuales pueden actuar como zonas de discontinuidad parcial en la transferencia de esfuerzos cortantes y limitar el incremento efectivo de la rigidez.

En relación con la validación externa, los valores del módulo de rigidez obtenidos se ubican dentro del rango reportado para maderas de densidad similar y siguen la tendencia general de dependencia entre la densidad y la rigidez, lo cual respalda la consistencia física de los resultados y su coherencia con modelos empíricos previamente establecidos. La ausencia de desviaciones significativas respecto a la literatura sugiere que el comportamiento observado en la madera laminada responde a mecanismos estructurales esperables en materiales lignocelulósicos, sin evidenciar efectos anómalos derivados del proceso de fabricación ni inconsistencias en la estimación experimental del módulo de rigidez dinámico.

Los resultados sugieren que la madera laminada de *F. crenata* podría representar una alternativa viable para aplicaciones donde se requiera una mayor uniformidad en el comportamiento mecánico, particularmente en elementos de pequeña o mediana escala y bajo condiciones de sollicitación comparables a las evaluadas en este estudio. No obstante, esta posible aplicabilidad debe interpretarse con cautela, ya que la extrapolación a elementos estructurales de mayor escala requiere considerar factores adicionales como la presencia de defectos, la variabilidad material, la calidad de las interfaces adhesivas y las condiciones reales de carga en servicio.

Entre las principales limitaciones del estudio se encuentran el tamaño reducido de la muestra, el uso de probetas de pequeñas dimensiones y la evaluación bajo condiciones experimentales controladas; lo cual restringe la generalización directa de los resultados. En este sentido, se recomienda que futuras investigaciones incrementen el tamaño muestral, evalúen diferentes configuraciones de laminación, analicen la influencia de la calidad de las interfaces adhesivas y comparen el método de vibraciones torsionales con otras técnicas dinámicas y estáticas, con el

fin de validar y ampliar los hallazgos obtenidos y fortalecer la base experimental para su aplicación en ingeniería de materiales y diseño estructural.

Agradecimientos

La investigación fue patrocinada por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México, por la Universidad Prefectoral de Akita, Japón y por el Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación, México.

Contribuciones de los autores

J. R. Sotomayor Castellanos: Conceptualización; investigación; redacción; revisión y edición. **F. Hawasly:** Metodología; redacción; revisión y edición. **K. Adachi:** Conceptualización; metodología y recursos. **S. Correa Jurado:** Metodología; curación de datos; visualización y preparación.

Referencias

- Abramowicz, M., Chybiński, M., Polus, L., & Wróblewski, T. (2024). Free Vibrations of Sustainable Laminated Veneer Lumber Slabs. *Sustainability*, *16*, 166. [\[En línea\]](#)
- Arriaga, F., Wang, X., Íñiguez-González, G., Llana, D. F., Esteban, M., & Niemz, P. (2023). Mechanical properties of wood: A Review. *Forests*, *14*, 1202. [\[En línea\]](#)
- ASTM International. (2015). *Standard test method for dynamic Young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio for advanced ceramics by impulse excitation of vibration (ASTM C1259-15)*. ASTM International.
- ASTM International. (2015). *Standard test method for dynamic Young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio by impulse excitation of vibration (ASTM E1876-15)*. ASTM International.
- Bartolucci, B., De Rosa, A., Bertolini, C., Berto, F., Penta, F., & Siani, A. M. (2020). Mechanical properties of the most common European woods: a literature review. *Frattura ed Integrità Strutturale*, *54*, 249-274. [\[En línea\]](#)
- Bilko, P., Skoratko, A., Rutkiewicz, A., & Małyszko, L. (2021). Determination of the Shear Modulus of Pine Wood with the Arcan Test and Digital Image Correlation. *Materials*, *14*, 468. [\[En línea\]](#)
- Boccacci, G., Frasca, F., Bertolin, C., & Siani, A. M. (2022). Influencing Factors in Acoustic Emission Detection: A Literature Review Focusing on Grain Angle and High/Low Tree Ring Density of Scots Pine. *Applied Sciences*, *12*(2), 859. [\[En línea\]](#)
- Bonett, D. G. (2002). Sample size requirements for estimating intraclass correlations with desired precision. *Statistics in Medicine*, *21*(9), 1331–1335. [\[En línea\]](#)
- Brandner, R., Flatscher, G., Ringhofer, A., Schickhofer, G., & Thiel, A. (2016). Cross laminated timber (CLT):

- Overview and development. *European Journal of Wood and Wood Products*, 74(3), 331–351. [\[En línea\]](#)
- Carreira, M. R., Segundinho, P. G. De A., Gonçalves, F. G., Paes, J. B., Dias, A. A., Medeiros Neto, P. N. De., Mastela, L. Da C., & Lopez, Y. M. (2022). Influence of moisture content on the dynamic modulus of elasticity. *Research, Society and Development*, 11(11), e232111133687. [\[En línea\]](#)
- Correa Jurado, S., Sotomayor Castellanos J. R., & Macedo Alquicira, I. (2024). Módulo de rigidez del multimaterial madera-malla-adhesivo de *Pinus pseudostrabus*, *Tabebuia rosea* y *Quercus scytophylla*. *Revista de Ingeniería y Ciencias Aplicadas*, 2(4), 11-23. [\[En línea\]](#)
- Ding, Y., Pang, Z., Lan, K., Yao, Y., Panzarasa, G., Xu, L., Ricco, M. L., Rammer, D. R., Zhu, J. Y., Hu, M., Pan, X., Li, T., Burgert, I., & Hu, L. (2023). Emerging Engineered Wood for Building Applications. *Chemical Reviews*, 123(5), 1843-1888. [\[En línea\]](#)
- Emmerich, L., Wülfing, G., & Brischke, C. (2019). The Impact of Anatomical Characteristics on the Structural Integrity of Wood. *Forests*, 10, 199. [\[En línea\]](#)
- Fu, W. L., Guan, H. Y., & Kei, S. (2021). Effects of Moisture Content and Grain Direction on the Elastic Properties of Beech Wood Based on Experiment and Finite Element Method. *Forests*, 12, 610. [\[En línea\]](#)
- He, S., Zhao, X., Wang, E. Q., Chen, G. S., Chen, P.-Y., & Hu, L. (2023). Engineered Wood: Sustainable Technologies and Applications. *Annual Review of Materials Research*, 53, 195-223. [\[En línea\]](#)
- Huang, Y., Chen, S., Dauletbeq, A., Yang, X., Wang, J., Sun, X., Xie, W., & Wang, Z. (2021). Dynamic Testing of the Elastic Modulus and Shear Modulus of Full-Scale Laminated Veneer Lumber. *BioResources*, 16(4), 8273-8288. [\[En línea\]](#)
- Ida, H., Sato, T., Rikukawa, Y., Abe, R., Hoyano S., & Tsuchimoto, T. (2023). Optimizing species selection for the structural timbers of traditional farmhouses in a snowy rural area of northeastern Japan. *Ecological Research*, 38(6), 795-808. [\[En línea\]](#)
- International Organization for Standardization. (2014a). *Physical and mechanical properties of wood—Test methods for small clear wood specimens—Part 1: Determination of moisture content for physical and mechanical tests (ISO 13061-1:2014)*. [\[En línea\]](#)
- International Organization for Standardization. (2014b). *Physical and mechanical properties of wood—Test methods for small clear wood specimens—Part 2: Determination of density for physical and mechanical tests (ISO 13061-2:2014)*. [\[En línea\]](#)
- Krüger, R., & Wagenführ, A. (2020). Comparison of methods for determining shear modulus of wood. *European Journal of Wood and Wood Products*, 78, 1087-1094. [\[En línea\]](#)
- Liu, F., Zhang, H., Jiang, F., Wang, X., & Guan, C. (2019). Variations in Orthotropic Elastic Constants of Green Chinese Larch from Pith to Sapwood. *Forests*, 10(5), 456. [\[En línea\]](#)
- Macedo Alquicira, I., Bedolla Arrollo, J., Raya González, D., Rutiaga Quiñonez, J., Castro Sánchez F., & Sotomayor Castellanos, J. (2022). Pruebas de torsión dinámica de madera sólida y de multimaterial de *Fagus crenata*. *Bosques Latitud Cero*, 12(2), 52-61. [\[En línea\]](#)
- Miyoshi, Y., Kojiro, K., & Furuta, Y. (2018). Effects of density and anatomical feature on mechanical properties of various wood species in lateral tension. *Journal of Wood Science*, 64, 509-514. [\[En línea\]](#)
- Ostapska, K., & Malo, K. A. (2021). New approach to testing shear in wood on structural scale. *International Journal of Solids and Structures*, 212, 46-60. [\[En línea\]](#)
- Osuna-Sequera, C., Hermoso, E., Fernandez-Golfín, J., & Luengo, E. (2023). Considerations on variability in acoustic measurements in timber property assessment. *Wood Material Science & Engineering*, 18(4), 1319-1328. [\[En línea\]](#)
- Ozyhar, T., Hering, S., & Niemz, P. (2012). Moisture-dependent elastic and strength anisotropy of European beech wood in tension. *Journal of Materials Science*, 47, 6141-6150. [\[En línea\]](#)
- Ramesh, M., Rajeshkumar, L., Sasikala, G., Balaji, D., Saravanakumar, A., Bhuvanawari, V., & Bhoopathi, R. A. (2022). Critical Review on Wood-Based Polymer Composites: Processing, Properties, and Prospects. *Polymers*, 14, 589. [\[En línea\]](#)
- Romero, A., & Odenbreit, C. (2023). Experimental Investigation on Strength and Stiffness Properties of Laminated Veneer Lumber (LVL). *Materials*, 16(22), 7194. [\[En línea\]](#)
- Sotomayor Castellanos, J. R. (2024). Estudio comparativo de módulos de rigidez de tres maderas mexicanas y tres maderas japonesas. *Ingenierías*, 27(96), 39-48. [\[En línea\]](#)
- Sotomayor Castellanos, J. R., Hawasly, F., Adachi, K., & Correa Jurado, S. (2024). Caracterización por ultrasonido de madera sólida y laminada de *Fagus crenata*. *Tecnociencia Chihuahua*, 18(3), e1636. [\[En línea\]](#)
- Sotomayor Castellanos, J. R., Macedo Alquicira I., & Zárate Medina, J. (2023). Módulo de rigidez de especies de madera de importancia comercial para México: *Pinus pseudostrabus*, *Tabebuia rosea* y *Quercus scytophylla*. *Manglar*, 20(3), 211-219. [\[En línea\]](#)
- Tapia, C., & Aicher, S. (2020). Variation and serial correlation of modulus of elasticity between and within European oak boards (*Quercus robur* and *Q. petraea*). *Holzforschung*, 74(1), 33-46. [\[En línea\]](#)
- Wang, Q., Wang, Z., Feng, X., Zhao, Y., & Li, Z. (2024). Mechanical properties and probabilistic models of wood and engineered wood products: A review of green construction materials. *Case Studies in Construction Materials*, 21, e03796. [\[En línea\]](#)
- Wang, Z., Zhang, D., Wang, Z., Liang, X., Yang, X., & Wang, J. (2023). Research Progress on Dynamic Testing Methods of Wood Shear Modulus: A Review. *BioResources*, 18(1), 2262-2270. [\[En línea\]](#)