



Caracterización dinámica de tableros a base de madera mediante ondas de esfuerzo y comparación con madera sólida de *Pinus pseudostrabus*

Dynamic characterization of wood-based panels using stress waves and comparison with solid *Pinus pseudostrabus* wood

Javier Ramón Sotomayor Castellanos  

Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Resumen

Los tableros a base de madera son materiales lignocelulósicos ampliamente utilizados en aplicaciones estructurales, cuyas propiedades mecánicas dependen de su arquitectura interna y de los procesos de fabricación. El objetivo de este estudio fue determinar y comparar la densidad aparente y el módulo dinámico de madera sólida de *Pinus pseudostrabus* y de cuatro tipos de tableros: enlistonados, contrachapados, de densidad media y de astillas orientadas. Se realizaron ensayos dinámicos mediante propagación de ondas de esfuerzo en probetas acondicionadas. Los resultados demuestran diferencias significativas entre materiales. Los tableros presentaron módulos dinámicos menores que la madera sólida y diferentes niveles de anisotropía, asociados a su estructura interna y procesos de fabricación.

Palabras clave: Ondas de esfuerzo, evaluación no destructiva, módulo dinámico, tableros de madera, anisotropía.

Abstract

Wood-based panels are lignocellulosic materials widely used in structural applications, whose mechanical properties depend on their internal structure and manufacturing processes. The objective of this study was to determine and compare the bulk density and dynamic modulus of elasticity of solid *Pinus pseudostrabus* wood and four types of industrial panels: blockboard, plywood, medium-density fiberboard, and oriented strand board. Dynamic tests were conducted using stress wave propagation on conditioned specimens. The results show significant differences between materials. The panels exhibited lower dynamic moduli than solid wood and different levels of anisotropy, associated with their internal structure and manufacturing processes.

Keywords: Stress waves, non-destructive evaluation, dynamic modulus of elasticity, wood panels, anisotropy.

Introducción

Los tableros a base de madera constituyen una familia de materiales lignocelulósicos industrializados ampliamente utilizados en la construcción, la manufactura de mobiliario y diversas aplicaciones estructurales y no estructurales. Los principios tecnológicos que rigen su fabricación, así como sus propiedades físicas y mecánicas relevantes para aplicaciones de ingeniería, han sido documentados extensamente en la literatura científica reciente (Antov *et al.*, 2020; Ramesh *et al.*, 2022; Costa *et al.*, 2024). En términos generales, estos materiales están formados por elementos de madera —chapas, listones, partículas, fibras o astillas— que se ensamblan mediante adhesivos sintéticos o naturales y posteriormente se consolidan bajo condiciones controladas de presión y temperatura, generando tableros estructuralmente estables (Zhang, 2023).

Historial

Manuscrito recibido: 23 de junio de 2025
Manuscrito aceptado: 14 de marzo de 2026
Manuscrito publicado: abril 2026

Autor para correspondencia

Javier Ramón Sotomayor Castellanos
javier.sotomayor@umich.mx
ORCID: 0000-0002-1527-8801

Como citar

Sotomayor Castellanos JR (2026). Caracterización dinámica de tableros a base de madera mediante ondas de esfuerzo y comparación con madera sólida de *Pinus pseudostrabus*. *Ciencia Nicolaita* 96:83-91. DOI:10.35830/cn.vi96.871

La producción de materiales de madera reconstituida representa una estrategia tecnológica clave en la ingeniería moderna de materiales lignocelulósicos. Este enfoque industrial busca reducir la elevada variabilidad inherente a la madera sólida —derivada de su origen biológico

y de su compleja estructura anatómica— mediante la transformación de la materia prima en elementos estructurales de menor escala. Posteriormente, estos elementos se reconstituyen mediante adhesivos y procesos de prensado en caliente bajo condiciones controladas de presión y temperatura, lo que permite obtener materiales con propiedades físicas y mecánicas más homogéneas y predecibles. En consecuencia, los productos derivados de madera reconstituida presentan características tecnológicas favorables para aplicaciones industriales y estructurales (Pizzi, 2016; Ferdosian *et al.*, 2017; Solt *et al.*, 2019).

El comportamiento físico-mecánico de los tableros a base de madera depende de múltiples factores, entre los que destacan el contenido de humedad, la dirección de medición respecto a la estructura interna del material y el tipo de producto. Estas variables influyen directamente en la propagación de ondas mecánicas y, por consiguiente, en la rigidez aparente del material (Han *et al.*, 2006). Asimismo, la especie de madera empleada, la configuración geométrica de los elementos constitutivos, el tipo de adhesivo y las condiciones del proceso de fabricación determinan la densidad, la estructura interna y, en consecuencia, las propiedades mecánicas del tablero (Aguilera y Davim, 2014). Debido a esta diversidad tecnológica, los productos disponibles en el mercado presentan una amplia variabilidad en sus propiedades físicas y mecánicas. En este contexto, la determinación del módulo dinámico constituye un parámetro fundamental para la caracterización mecánica y el análisis estructural de materiales lignocelulósicos utilizados en aplicaciones de ingeniería.

Las técnicas basadas en propagación de ondas mecánicas constituyen métodos no destructivos ampliamente utilizados para la caracterización de materiales derivados de madera. En particular, las ondas de esfuerzo permiten estimar propiedades dinámicas asociadas a la rigidez del material, mientras que técnicas relacionadas, como la emisión acústica, se emplean en el diagnóstico estructural y en el mantenimiento preventivo de estructuras de madera (Nasir *et al.*, 2022; Solt *et al.*, 2024).

Diversos estudios han reportado resultados sobre el módulo dinámico tanto en madera sólida (Mvolo *et al.*, 2022) como en tableros derivados de madera (Bucur, 2023). Asimismo, las técnicas de evaluación no destructiva basadas en propagación de ondas han sido ampliamente documentadas como herramientas confiables para la estimación de propiedades mecánicas en materiales lignocelulósicos y para su clasificación tecnológica en aplicaciones estructurales (Ross, 2015). Sin embargo, la literatura científica muestra aún una disponibilidad

limitada de estudios experimentales comparativos que analicen simultáneamente distintos tipos de tableros comerciales y su relación con la madera sólida utilizada como material de referencia (Wang *et al.*, 2023).

Los productos derivados de madera reconstituida se comercializan generalmente en dimensiones estandarizadas y en diferentes calidades industriales, siendo utilizados ampliamente en la construcción y en la industria del mobiliario. Los principios tecnológicos de producción y las aplicaciones estructurales de estos materiales se describen en documentos técnicos de referencia, como el Engineered Wood Construction Guide (Engineered Wood Association, 2019) y el Wood Handbook: Wood as an Engineering Material (Forest Products Laboratory, 2021). No obstante, a pesar de su amplia disponibilidad comercial, la información experimental publicada sobre sus propiedades dinámicas determinadas mediante técnicas no destructivas —especialmente aquellas basadas en la propagación de ondas de esfuerzo— sigue siendo limitada. En particular, la cuantificación del módulo dinámico mediante métodos no destructivos resulta de interés para el desarrollo de criterios de clasificación estructural y evaluación tecnológica de materiales derivados de madera, ya que permite estimar propiedades mecánicas de forma rápida, reproducible y sin dañar los elementos evaluados.

Por otra parte, la madera de *Pinus pseudostrobus* Lindl. es una de las especies de coníferas ampliamente utilizadas en México en aplicaciones estructurales y en la manufactura de productos derivados de madera. Sus características anatómicas, propiedades físicas y usos tecnológicos han sido documentados en estudios sobre maderas mexicanas (Rendón *et al.*, 2021). Asimismo, las propiedades físicas y mecánicas de esta especie constituyen una referencia en investigaciones relacionadas con la variabilidad de la densidad, la velocidad de propagación de ondas acústicas y los módulos dinámicos en maderas (Sotomayor *et al.*, 2020). Debido a su disponibilidad regional y a la información existente sobre sus propiedades mecánicas, esta especie constituye un material de referencia apropiado para estudios comparativos con productos derivados de madera reconstituida.

En este contexto, surge la interrogante de si la arquitectura interna de los tableros a base de madera —definida por la disposición y orientación de sus elementos constitutivos, tales como partículas, chapas, fibras o listones— influye en la magnitud del módulo dinámico determinado mediante técnicas no destructivas basadas en la propagación de ondas de esfuerzo. La hipótesis de investigación plantea que, a pesar de las discontinuidades estructurales inherentes a los materiales lignocelulósicos reconstituidos, los módulos dinámicos de los tableros

se sitúan dentro del mismo orden de magnitud que los correspondientes a la madera sólida de *P. pseudostrobus*, utilizada en este estudio como material de referencia.

Con el propósito de contrastar la hipótesis planteada, el objetivo de esta investigación fue determinar y comparar la densidad aparente y el módulo dinámico de la madera sólida de *P. pseudostrobus*, utilizada como material de referencia, y de cuatro tipos de tableros a base de madera: tableros enlistonados, tableros contrachapados, tableros de densidad media y tableros de astillas orientadas. Las propiedades dinámicas se determinaron mediante ensayos no destructivos basados en la propagación de ondas longitudinales de esfuerzo en probetas representativas de cada material. El estudio corresponde a un análisis experimental comparativo realizado sobre muestras comerciales de los materiales evaluados, con el fin de analizar la influencia de la arquitectura interna del material en el módulo dinámico determinado mediante técnicas dinámicas.

Materiales y métodos

Materiales

Se utilizaron muestras de madera sólida de *P. pseudostrobus* y cuatro tipos de tableros comerciales a base de madera. Diez piezas de madera aserrada de *P. pseudostrobus* fueron adquiridas en aserraderos localizados en el estado de Michoacán, México. Los tableros evaluados se obtuvieron en establecimientos comerciales de la ciudad de Morelia, Michoacán, y corresponden a productos industriales disponibles en el mercado con dimensiones comerciales estándar de 1.22 m × 2.44 m.

La identificación del fabricante no se consideró un factor experimental, ya que el objetivo del estudio fue analizar el efecto de la arquitectura interna del material—definida por la disposición de chapas, listones, fibras o partículas—sobre el módulo dinámico. En consecuencia, se utilizaron materiales representativos de productos comerciales comúnmente empleados en aplicaciones de ingeniería de la madera.

Los espesores nominales de los materiales evaluados fueron los siguientes: madera sólida de *P. pseudostrobus*, 20 mm; tableros enlistonados, 17.5 mm; tableros contrachapados, 18 mm; tableros de densidad media, 18 mm; y tableros de astillas orientadas, 16 mm (**Figura 1**).

A partir de estos materiales se elaboraron probetas experimentales para los ensayos dinámicos. En el caso de la madera sólida se prepararon 32 probetas orientadas en la dirección longitudinal de la fibra. Las probetas se obtuvieron a partir de las diez piezas de madera aserrada

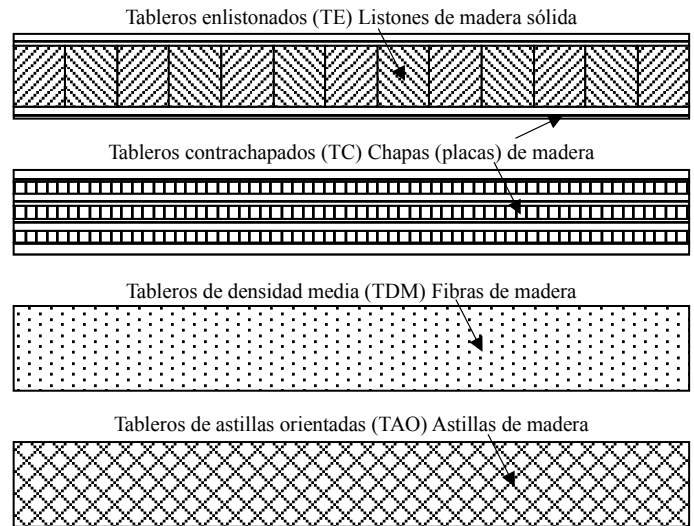


Figura 1. Esquemas de la estructura de los tableros.

disponibles, distribuyendo las muestras de manera homogénea y aleatoria entre las piezas originales. Este procedimiento permitió reducir los efectos asociados a la variabilidad intra-pieza y asegurar que el conjunto de mediciones represente la variabilidad natural del material.

Para cada tipo de tablero se prepararon 32 probetas en dirección longitudinal (L), paralela al eje mayor del tablero, y 32 probetas en dirección transversal (T), perpendicular a dicha dirección (**Figura 2**). Las dimensiones finales de las probetas fueron 15 cm de ancho × 60 cm de largo × espesor correspondiente al material.

Antes de los ensayos, el material experimental fue acondicionado en una cámara climática a 20 °C de temperatura y 65% de humedad relativa hasta alcanzar masa constante, con el fin de estabilizar el contenido de humedad de las probetas y garantizar condiciones comparables entre los materiales evaluados.

Métodos

El contenido de humedad de las probetas se determinó mediante la relación entre la masa en el momento del ensayo y la masa en condición anhidra, de acuerdo con el procedimiento establecido en la norma ISO 13061-1:2014. La densidad aparente se calculó como la relación entre la masa y el volumen de cada probeta conforme a la norma ISO 13061-2:2014.

Las mediciones dinámicas se realizaron mediante el método de propagación de ondas longitudinales de esfuerzo, siguiendo el protocolo experimental descrito por Sotomayor y Adachi (2023). La onda de esfuerzo se generó mediante el impacto de una esfera de acero acoplada a un péndulo instrumental, produciendo una onda longitudinal transitoria que se propagó a lo largo

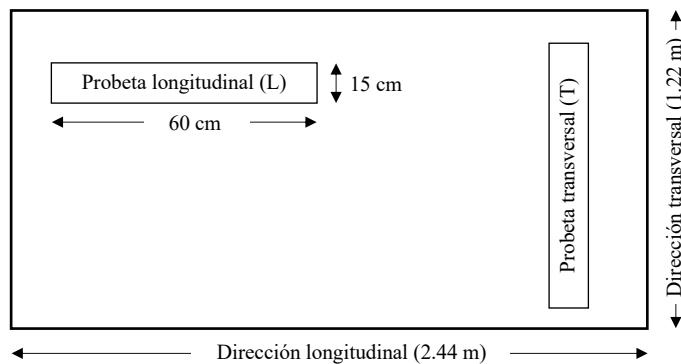


Figura 2. Diagrama de selección de probetas en los tableros.

de la probeta. La emisión y recepción de la señal fueron registradas mediante acelerómetros instalados en los apoyos de la probeta, ubicados a 5 cm de cada extremo, con una distancia efectiva de medición de 50 cm (**Figura 3**). El tiempo de tránsito de la onda entre los sensores permitió calcular la velocidad de onda longitudinal en cada muestra. Cada probeta fue ensayada tres veces, y el valor utilizado en el análisis correspondió al promedio de las mediciones obtenidas.

El módulo dinámico se estimó a partir de la relación entre la densidad aparente del material y la velocidad de onda longitudinal, de acuerdo con el modelo teórico de propagación de ondas elásticas en sólidos (Ecuación 1). Esta relación es ampliamente utilizada en técnicas de evaluación no destructiva para estimar la rigidez dinámica de materiales lignocelulósicos mediante mediciones acústicas o de ondas de esfuerzo (Bucur, 2006; Ross, 2015).

$$E_{oe} = \rho_{CH} v_{oe}^2 \quad (1)$$

donde:

E_{oe} = Módulo dinámico (MPa)

ρ_{CH} = Densidad aparente (kg/m³)

v_{oe} = Velocidad de onda (m/s)

Diseño experimental

Las variables de respuesta del estudio fueron la densidad aparente y el módulo dinámico determinados mediante ensayos de propagación de ondas de esfuerzo. En los tableros, el módulo dinámico se evaluó en dos direcciones principales: longitudinal (L), paralela al eje mayor del tablero, y transversal (T), perpendicular a dicha dirección.

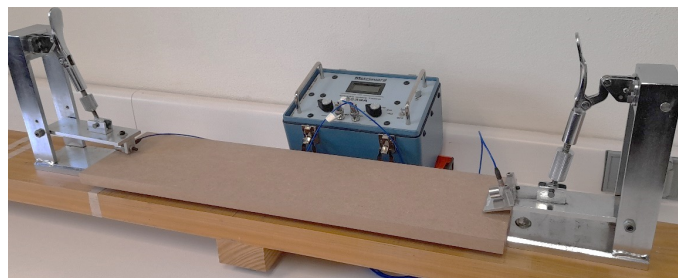


Figura 3. Pruebas de ondas de esfuerzo en tableros de densidad media.

La madera sólida de *P. pseudostrobus* (Madera de pino, MP) se utilizó como material de referencia, realizándose las mediciones únicamente en dirección longitudinal, correspondiente a la dirección de la fibra. El contenido de humedad (CH) se consideró una variable de control experimental. El diseño estadístico correspondió a un ANOVA de un factor (tipo de material) bajo un diseño completamente aleatorizado con cinco grupos experimentales y 32 observaciones por grupo (n = 32).

Los resultados se organizaron según el tipo de material evaluado: madera sólida de *P. pseudostrobus* (MP), tableros enlistonados (TE), tableros contrachapados (TC), tableros de densidad media (TDM) y tableros de astillas orientadas (TAO). Para cada grupo se calcularon estadísticos descriptivos: media aritmética (μ), desviación estándar (σ) y coeficiente de variación ($CV = \sigma/\mu$), con el fin de caracterizar la tendencia central y la dispersión de las propiedades físicas y mecánicas. En los tableros, las mediciones en direcciones longitudinal (L) y transversal (T) se analizaron por separado para preservar la información de anisotropía. Los análisis estadísticos se realizaron con el paquete estadístico Statgraphics Centurion 19.

La normalidad de la distribución de los datos se evaluó mediante los coeficientes de sesgo estandarizado (S) y apuntamiento estandarizado (A), considerando valores entre -2 y +2 como compatibles con una distribución normal. Posteriormente se aplicó un ANOVA de un factor para comparar las medias entre materiales, con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$, rechazando la hipótesis nula $H_0: \mu_{MP} = \mu_{TE} = \mu_{TC} = \mu_{TDM} = \mu_{TAO}$ cuando $p < 0.05$. Adicionalmente, se compararon los coeficientes de variación (CV) para evaluar la homogeneidad de los materiales y se calcularon las relaciones de anisotropía de los tableros, definidas como $A = E_{oe L} / E_{oe T}$, donde $E_{oe L}$ y $E_{oe T}$ corresponden a los módulos dinámicos longitudinal y transversal.

Resultados y discusión

El contenido de humedad de la madera sólida de *P. pseudostrobus*, utilizada como material de referencia, se

encuentra dentro del intervalo registrado para los tableros evaluados, con valores comprendidos entre 10% y 12% y coeficientes de variación entre 4% y 7% (Tabla 1). Estos resultados indican que, después del acondicionamiento en cámara climática a 20 °C y 65% de humedad relativa, las probetas alcanzaron un estado higroscópico estable y comparable entre los distintos materiales analizados. La similitud en el contenido de humedad entre los materiales permite asumir que las diferencias observadas posteriormente en la densidad aparente y en el módulo dinámico no se deben a variaciones higroscópicas, sino principalmente a las características estructurales de los materiales y a los procesos de fabricación involucrados en la producción de los tableros.

Las pruebas de verificación de normalidad aplicadas a los valores de densidad aparente y módulo dinámico indicaron que los datos presentan una distribución compatible con la normalidad, ya que los coeficientes de sesgo y apuntamiento estandarizados se encuentran dentro del interva-

lo de aceptación $-2 \leq S, A \leq 2$ (Tabla 2). Esta condición permitió aplicar procedimientos estadísticos paramétricos para la comparación entre grupos experimentales.

A partir de los datos estadísticos descriptivos expuestos en la Tabla 1 y teniendo en cuenta un tamaño de muestra de $n = 32$ observaciones por grupo, el análisis de varianza de un factor para evaluar el impacto del tipo de material en la densidad aparente y el módulo dinámico longitudinal señala diferencias significativas entre los materiales evaluados ($p < 0.001$).

Los resultados del análisis de varianza indican que el tipo de material ejerce una influencia estadísticamente significativa sobre la densidad aparente y el módulo dinámico. Los valores elevados del estadístico F muestran que la variabilidad entre los grupos experimentales es considerablemente mayor que la variabilidad observada dentro de cada grupo, lo que evidencia diferencias sistemáticas entre los materiales evaluados. En consecuencia, se rechaza la hipótesis nula de igualdad de medias y se confirma que las propiedades físicas y mecánicas de los tableros derivados de madera difieren significativamente de las de la madera sólida utilizada como material de referencia. Estas diferencias son consistentes con los valores medios y la dispersión de los datos presentados en la Tabla 1 y en las Figuras 4, 5 y 6.

El análisis comparativo de las densidades promedio muestra diferencias claras entre la madera sólida de *P. pseudostrobus* y los distintos tipos de tableros evaluados (Tabla 1, Figura 4). La madera sólida presenta valores característicos asociados a su estructura anatómica natural, mientras que los tableros enlistonados exhiben densidades considerablemente menores debido a su configuración estructural basada en listones ensamblados y recubiertos por chapas superficiales, lo que genera una estructura relativamente menos compacta con posibles espacios intersticiales.

Tabla 1. Contenido de humedad, densidad aparente y módulos dinámicos.

	CH (%)	ρ_{CH} (kg/m ³)	E_{oc} T (MPa)	E_{oc} L (MPa)
<i>Pinus pseudostrobus</i> (MP)				
μ	11	596	-	10630
σ	0.6	46	-	2478
CV	(6)	(8)	-	(23)
Tableros enlistonados (TE)				
μ	12	319	1161	3085
σ	0,5	39	190	565
CV	(4)	(12)	(16)	(18)
Tableros contrachapados (TC)				
μ	11	506	2637	4717
σ	0.6	15	376	870
CV	(5)	(3)	(14)	(18)
Tableros de densidad media (TDM)				
μ	10	634	2260	2323
σ	0.4	6	108	82
CV	(4)	(1)	(5)	(4)
Tableros de astillas orientadas (TAO)				
μ	10	695	2349	3368
σ	0.7	39	282	544
CV	(7)	(6)	(12)	(16)

CH = Contenido de humedad; ρ_{CH} = Densidad aparente; E_{oc} = Módulo dinámico; T = Dirección transversal; L = Dirección longitudinal; μ = Media; σ = Desviación estándar; CV = Coeficiente de variación en por ciento y entre paréntesis.

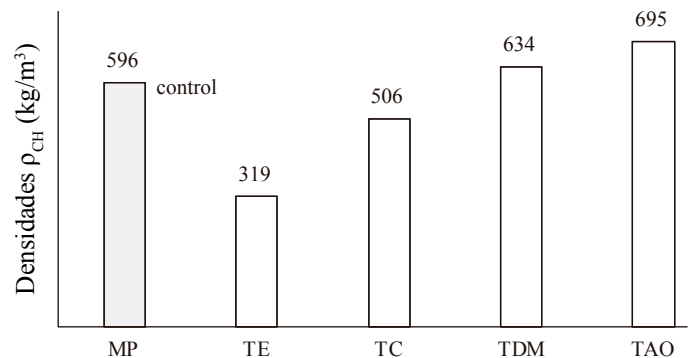


Figura 4. Comparativo de las densidades. MP = Madera de pino; TE = Tableros enlistonados; TC = Tableros contrachapados; TDM = Tableros de densidad media; TAO = Tableros de astillas orientadas

Tabla 2. Verificación de normalidad mediante sesgo estandarizado y curtosis estandarizada y resultados del análisis de varianza (ANOVA) para la densidad y el módulo dinámico de los materiales evaluados.

Material	S	A	F	P
Densidad (ρ_{CH})				
<i>Pinus pseudostrabus</i> (MP)	-0.033	-1.074	631.07	< 0.001
Tableros enlistonados (TE)	0.901	-0.561		
Tableros contrachapados (TC)	0.072	-0.728		
Tableros de densidad media (TDM)	-0.543	-0.520		
Tableros de astillas orientadas (TAO)	-0.535	-0.681		
Módulo dinámico (E_{oe})				
<i>Pinus pseudostrabus</i> (MP)	0.057	-0.282	240.02	< 0.001
Tableros enlistonados (TE)	0.804	0.609		
Tableros contrachapados (TC)	-1.358	-0.834		
Tableros de densidad media (TDM)	-0.350	-1.221		
Tableros de astillas orientadas (TAO)	-0.962	0.800		

S = Sesgo estandarizado; A = Apuntamiento; Los datos se consideran compatibles con una distribución normal cuando $-2 \leq S, A \leq 2$; F = estadístico de Fisher del análisis de varianza (ANOVA), definido como la razón entre la varianza media entre grupos y la varianza media dentro de los grupos; El criterio de decisión se estableció para $\alpha = 0.05$; se rechaza la hipótesis nula de igualdad de medias cuando $P < 0.05$; En este estudio $P < 0.001$ indica diferencias significativas entre los materiales evaluados.

En contraste, los tableros contrachapados presentan densidades más cercanas a las de la madera sólida. Este comportamiento se explica por la superposición de chapas prensadas en direcciones alternadas, lo cual favorece una mayor continuidad material y una distribución relativamente uniforme de la masa en el volumen del tablero. Por su parte, los tableros de densidad media y los tableros de astillas orientadas presentan densidades superiores al material de referencia. Este incremento se relaciona con la fragmentación previa de la madera en fibras o partículas y su posterior consolidación mediante presión, temperatura y adhesivos, procesos que incrementan el grado de compactación del material.

Las diferencias observadas evidencian que la densidad final de los productos derivados de madera de-

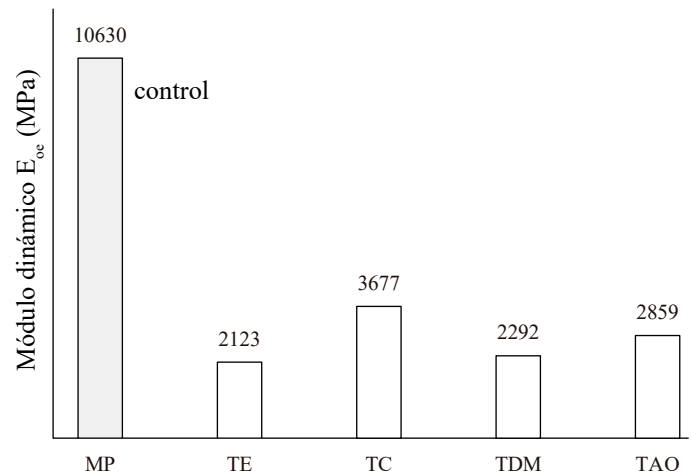


Figura 5. Comparativo de los módulos dinámicos promedio. MP = Madera de pino; TE = Tableros enlistonados; TC = Tableros contrachapados; TDM = Tableros de densidad media; TAO = Tableros de astillas orientadas.

pende en gran medida del proceso de fabricación y de la organización interna de sus componentes. La proporción relativa entre madera y adhesivo, así como el grado de compactación alcanzado durante el prensado industrial, influyen directamente en la estructura interna del material y, en consecuencia, en sus propiedades físicas.

En términos de dispersión estadística, los coeficientes de variación indican que la madera sólida presenta una variabilidad moderada ($CV = 8\%$, **Tabla 1**), asociada principalmente a la heterogeneidad anatómica natural y a las condiciones de crecimiento del árbol. Los tableros enlistonados muestran una variabilidad ligeramente mayor ($CV = 12\%$), atribuible a la diversidad estructural de los listones utilizados en su fabricación. En contraste, los tableros contrachapados, de densidad media y de astillas orientadas presentan coeficientes de variación considerablemente menores (3%, 1% y 6%, respectivamente), lo que refleja una mayor uniformidad en sus propiedades físicas. Esta homogeneidad es consecuencia de los procesos industriales de producción, en los cuales la madera se fragmenta, clasifica y redistribuye antes del prensado final, mientras que la incorporación de adhesivos contribuye a estabilizar la estructura interna del material y reducir la dispersión de sus propiedades (Pizzi, 2016; Ferdosian *et al.*, 2017).

Módulos dinámicos

Las pruebas de verificación de normalidad aplicadas a los valores del módulo dinámico indicaron que los datos presentan una distribución compatible con la normalidad. Asimismo, las medias correspondientes a los cinco grupos experimentales muestran diferencias

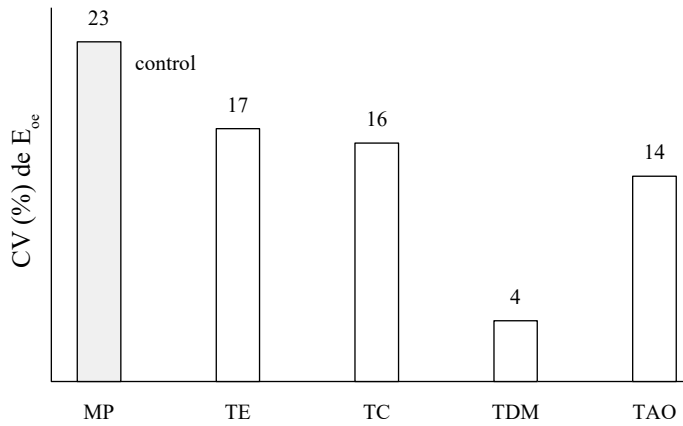


Figura 6. Comparativo de los coeficientes de variación de los módulos dinámicos promedio. MP = Madera de pino; TE = Tableros enlistonados; TC = Tableros contrachapados; TDM = Tableros de densidad media; TAO = Tableros de astillas orientadas.

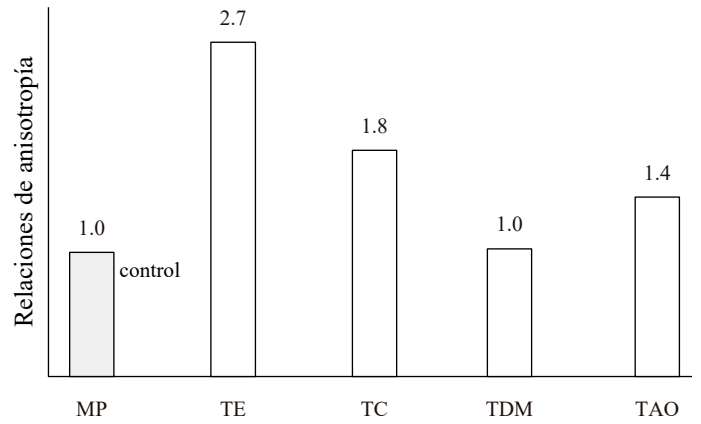


Figura 7. Comparativo de las relaciones de anisotropía de los módulos dinámicos. MP = Madera de pino; TE = Tableros enlistonados; TC = Tableros contrachapados; TDM = Tableros de densidad media; TAO = Tableros de astillas orientadas.

estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95% ($p < 0,001$) según el análisis de varianza (**Tabla 2**). Este resultado confirma que el tipo de material influye significativamente en la magnitud del módulo dinámico determinado mediante ondas de esfuerzo.

Las técnicas basadas en ondas mecánicas se utilizan ampliamente en la evaluación no destructiva de materiales lignocelulósicos, ya que la velocidad de onda está directamente relacionada con la rigidez del material y con su densidad (Han *et al.*, 2006; Morales *et al.*, 2013). En consecuencia, las diferencias observadas en los valores de E_{oe} reflejan la influencia de la estructura interna del material y de los procesos de fabricación sobre la transmisión de ondas mecánicas (**Tabla 1**, **Figura 5**).

El módulo dinámico promedio de los cuatro tipos de tableros evaluados es aproximadamente 74% menor que el correspondiente a la madera sólida de *P. pseudostrubus* (**Tabla 1**). Esta diferencia puede explicarse por la naturaleza estructural de los materiales reconstituidos, los cuales están formados por elementos discretos —listones, chapas, fibras o astillas— unidos mediante adhesivos. A diferencia de la madera sólida, que presenta continuidad estructural a lo largo de las fibras, los tableros contienen múltiples interfaces entre componentes que introducen discontinuidades internas. Estas interfaces reducen la eficiencia en la transmisión de las ondas de esfuerzo, disminuyendo la velocidad de onda y, en consecuencia, el módulo dinámico resultante (Han *et al.*, 2006; Morales *et al.*, 2013).

A pesar de presentar valores absolutos menores de módulo dinámico, los tableros muestran una menor dispersión estadística en comparación con la madera sólida. Los coeficientes de variación disminuyen aproximadamente 26% en los tableros enlistonados, 30% en los con-

trachapados, 83% en los tableros de densidad media y 39% en los tableros de astillas orientadas, en comparación con el material de referencia (**Figura 6**). Esta reducción en la variabilidad refleja la mayor homogeneidad estructural obtenida mediante los procesos industriales de fabricación, en los cuales la madera se fragmenta, se clasifica y se redistribuye antes del prensado final. Como resultado, las irregularidades anatómicas presentes en la madera natural se atenúan, produciendo materiales con propiedades mecánicas más uniformes, fenómeno reportado previamente en materiales compuestos derivados de madera (Han *et al.*, 2006; Hillig *et al.*, 2024).

Anisotropía del módulo dinámico

En relación con las direcciones principales de los tableros en sus dimensiones comerciales (**Figura 2**), los tableros enlistonados, contrachapados y de astillas orientadas presentan una relación de anisotropía cercana a 2:1 entre los módulos dinámicos determinados en las direcciones longitudinal (L) y transversal (T) (**Figura 7**). Este comportamiento refleja la orientación preferencial de los elementos estructurales que constituyen estos materiales.

En los tableros enlistonados, los listones de madera sólida se disponen principalmente en dirección longitudinal, lo que favorece una mayor rigidez y una transmisión más eficiente de las ondas de esfuerzo en esa dirección. En los tableros contrachapados, aunque las chapas se disponen en direcciones alternadas, las capas externas mantienen una orientación predominante que influye en la rigidez global del tablero. De manera similar, en los tableros de astillas orientadas las partículas de las capas superficiales se alinean preferentemente en la dirección longitudinal durante el proceso de fabricación. Esta orientación estructural favorece la propagación de ondas de esfuerzo

en dicha dirección (Faktorová *et al.*, 2024; Sotomayor y Adachi, 2023).

En contraste, los tableros de densidad media presentan un comportamiento prácticamente isotrópico, debido a la distribución relativamente aleatoria de las fibras que componen el material. Esta configuración microestructural genera propiedades mecánicas similares en diferentes direcciones del plano del tablero, reduciendo significativamente la anisotropía observada en comparación con otros productos derivados de madera (Kotlínová *et al.*, 2010).

Conclusiones

Los resultados experimentales obtenidos mediante ensayos dinámicos basados en propagación de ondas de esfuerzo demuestran que la arquitectura interna de los tableros a base de madera influye significativamente en la magnitud del módulo dinámico. El análisis estadístico evidenció diferencias significativas entre los materiales evaluados, lo que confirma que la disposición estructural de los elementos constitutivos, listones, chapas, fibras o astillas, condiciona el comportamiento dinámico de estos productos lignocelulósicos.

Los módulos dinámicos de los tableros evaluados resultaron significativamente inferiores a los de la madera sólida de *P. pseudostrobus* utilizada como material de referencia. En promedio, los valores del módulo dinámico de los tableros enlistonados, contrachapados, de densidad media y de astillas orientadas fueron aproximadamente 74% menores que los correspondientes a la madera sólida. Esta diferencia se atribuye a la naturaleza compuesta de los tableros, caracterizada por la presencia de interfaces entre los elementos estructurales y por la incorporación de adhesivos durante el proceso de fabricación, lo que introduce discontinuidades internas que reducen la eficiencia en la transmisión de las ondas de esfuerzo.

Se observaron además diferencias sistemáticas en la densidad aparente de los materiales analizados. Los tableros enlistonados presentaron densidades inferiores a las de la madera sólida, los tableros contrachapados mostraron valores intermedios cercanos al material de referencia, mientras que los tableros de densidad media y los tableros de astillas orientadas presentaron densidades superiores. Estas diferencias reflejan el efecto de los procesos industriales de fabricación, particularmente el grado de fragmentación de la materia prima lignocelulósica y el nivel de compactación alcanzado durante el prensado.

Los resultados también indican que los tableros presentan una menor variabilidad en sus propiedades físico-mecánicas en comparación con la madera

sólida, lo que evidencia el efecto de homogenización estructural producido por los procesos de fabricación. Esta característica puede representar una ventaja tecnológica para aplicaciones en ingeniería de la madera donde se requiere mayor uniformidad en el comportamiento mecánico de los materiales.

Finalmente, el estudio confirma la utilidad de las técnicas no destructivas basadas en propagación de ondas de esfuerzo para la caracterización mecánica de productos derivados de madera. Futuras investigaciones podrían ampliar el alcance experimental incorporando otras especies forestales, diferentes configuraciones de tableros y técnicas complementarias de evaluación no destructiva, con el fin de establecer relaciones más robustas entre propiedades dinámicas y propiedades mecánicas utilizadas en el diseño estructural de materiales lignocelulósicos.

Agradecimientos

La presente investigación fue financiada por la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), México. El autor agradece a los estudiantes de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera de esta institución por su colaboración en las actividades experimentales y los trabajos de laboratorio.

Referencias

- Aguilera A, Davim JP (2014) Research Developments in Wood Engineering and Technology. IGI Global Scientific Publishing, Hershey, PA, USA, p 356. doi:10.4018/978-1-4666-4554-7
- Antov P, Savov V, Neykov N (2020). Sustainable bio-based adhesives for eco-friendly wood composites: A review. *Wood Research* 65(1):51-62. doi:10.37763/wr.1336-4561/65.1.051062
- Bucur V (2006). Acoustics of wood. *Springer*, p. 393. doi:10.1007/3-540-30594-7
- Bucur V (2023). A review on acoustics of wood as a tool for quality assessment. *Forests* 14:1545. doi:10.3390/f14081545
- Costa D, Serra J, Quinteiro P, Dias AC (2024). Life cycle assessment of wood-based panels: A review. *Journal of Cleaner Production* 444:140955. doi:10.1016/j.jclepro.2024.140955
- Faktorová D, Gaff M, Gašparík M, Kaplan L (2024). Influence of structure and orientation on dynamic mechanical properties of wood-based panels. *Wood Research* 69(2):243-256. doi:10.37763/wr.1336-4561/69.2.243256
- Ferdosian F, Pan Z, Gao G, Zhao B (2017). Bio-based adhesives

- and evaluation for wood composites application. *Polymers* 9(2):70. doi:10.3390/polym9020070
- Forest Products Laboratory (2021). Wood handbook: Wood as an engineering material. *U.S. Department of Agriculture Forest Service*, p. 508.
- Han G, Wu Q, Wang X (2006). Stress-wave velocity of wood-based panels: Effect of moisture, product type, and material direction. *Forest Products Journal* 56(1):28-33.
- Hillig É, Bobadilla I, Arriaga F, Íñiguez-González G (2024). Using acoustic testing to estimate strength and stiffness of wood-polymer composites. *Maderas Ciencia y Tecnología* 26:1-16. doi:10.22320/s0718221x/2024.04
- International Organization for Standardization (2014a). ISO 13061-1: Physical and mechanical properties of wood – Test methods for small clear wood specimens – Part 1: Determination of moisture content. *International Organization for Standardization*.
- International Organization for Standardization (2014b). ISO 13061-2: 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*.
- Kotlínová M, Gaff M, Gašparík M (2010). Mechanical properties and anisotropy of medium-density fiberboard. *Drvna Industrija* 61(4):253-259.
- Morales E, Cown D, McLean J (2013). Relationship between stress wave velocity and stiffness in wood-based composites. *Forest Products Journal* 63(5-6):195-203. doi:10.13073/FPJ-D-12-00091
- Mvolo CS, Stewart JD, Koubaa A (2022). Comparison between static modulus of elasticity, non-destructive testing moduli of elasticity and stress-wave speed in white spruce and lodgepole pine wood. *Wood Material Science and Engineering* 17(5):345-355. doi:10.1080/17480272.2021.1871949
- Nasir V, Ayanleye S, Kazemirad S, Sassani F, Adamopoulos S (2022). Acoustic emission monitoring of wood materials and timber structures: A critical review. *Construction and Building Materials* 350:128877. doi:10.1016/j.conbuildmat.2022.128877
- Pizzi A (2016). Wood products and green chemistry. *Annals of Forest Science* 73:185-203. doi:10.1007/s13595-014-0448-3
- Ramesh M, Rajeshkumar L, Sasikala G, Balaji D, Saravanakumar A, Bhuvaneshwari V, Bhoopathi RA (2022). Critical review on wood-based polymer composites: Processing, properties, and prospects. *Polymers* 14:589. doi:10.3390/polym14030589
- Rendón A, Dorantes F, Mejía S, Alamilla L (2021). Características macroscópicas, propiedades y usos de la madera de especies nativas y exóticas en México. *Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad*.
- Ross RJ (2015). Nondestructive evaluation of wood. *U.S. Department of Agriculture Forest Service*, p. 169.
- Solt P, Konnerth J, Gindl-Altmutter W, Kantner W, Moser J, Mitter R, van Herwijnen HWG (2019). Technological performance of formaldehyde-free adhesive alternatives for particleboard industry. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 94:99-131. doi:10.1016/j.ijadhadh.2019.04.007
- Sotomayor Castellanos JR, Adachi K (2023). Anisotropía en velocidades de onda y módulos dinámicos determinados con ondas de esfuerzo en maderas mexicanas y japonesas. *Ciencia e Investigación Forestal* 29(3):45-60. doi:10.52904/0718-4646.2023.595
- Sotomayor Castellanos JR, Macedo Alquicira I, Chávez García HL (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. doi:10.14482/inde.38.2.624.15
- The Engineered Wood Association (2019). Engineered wood construction guide. *APA – The Engineered Wood Association*.
- 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. doi:10.15376/biores.18.1.Wang
- Zhang J (2023). Current applications of engineered wood. *IntechOpen*.