

Anisotropía acústica en multimaterial madera-malla-adhesivo de *Fagus crenata*

Javier Ramón Sotomayor Castellanos^A, Israel Macedo Alquicira^A,
Koji Adachi^B, Firas Hawasly^B

^A Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo,
Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, México

^B Universidad Prefectoral de Akita, Instituto de Tecnología de la Madera, Japón
0934111e@umich.mx, cesar.gonzalezcr@uanl.edu.mx, hawasly_firas@iwt.akita-pu.ac.jp

Autor de correspondencia: madera999@yahoo.com

RESUMEN

El estudio analiza el efecto de convertir madera de Fagus crenata en un multimaterial madera-malla de acero-adhesivo sobre su anisotropía acústica. Mediante ensayos ultrasónicos no destructivos se compararon velocidades de onda en direcciones tangencial y longitudinal entre madera sólida y multimaterial. El multimaterial mostró mayor densidad, un aumento del 91 % en la velocidad tangencial y una disminución del 26 % en la longitudinal. Como resultado, el coeficiente de anisotropía acústica se redujo de 3.18 a 1.29, evidenciando una marcada homogeneización de las propiedades acústicas y un comportamiento más isotrópico.

PALABRAS CLAVE

Ensayos ultrasónicos, velocidad de onda, incremento de densidad, homogeneización de propiedades, comportamiento isotrópico.

ABSTRACT

This study analyzes the effect of converting Fagus crenata wood into a wood-steel mesh-adhesive multimaterial on its acoustic anisotropy. Using non-destructive ultrasonic testing, wave velocities in the tangential and longitudinal directions were compared between solid wood and the multimaterial. The multimaterial exhibited higher density, a 91% increase in tangential velocity, and a 26% decrease in longitudinal velocity. Consequently, the acoustic anisotropy coefficient was reduced from 3.18 to 1.29, demonstrating a marked homogenization of acoustic properties and a more isotropic behavior.

KEYWORDS

Ultrasonic testing, wave velocity, density increase, property homogenization, isotropic behavior.

INTRODUCCIÓN

La anisotropía es una propiedad natural de la madera y de los materiales elaborados a partir de ella, lo que implica que sus propiedades físicas y mecánicas cambian dependiendo del sentido en el cual se estén evaluando. Esta propiedad, que proviene de su estructura anatómica,^{1,2} le da al material diferentes niveles de estabilidad y resistencia en sus tres direcciones principales: radial, tangencial y longitudinal.^{3,4} Asimismo, la propagación del ultrasonido puede no ser uniforme en todas las direcciones, lo cual afecta la eficiencia de estos materiales cuando se utilizan para amortiguar vibraciones o como aislamiento acústico.⁵

Los métodos que se utilizan en la investigación actual para comprender y mejorar las propiedades de los materiales de madera son el modelado numérico^{6,7} y las técnicas no destructivas de caracterización.^{8,9} En este sentido, una estrategia esencial es la creación de nuevos materiales compuestos,^{10,11} que combinan madera con otros elementos, como mallas metálicas¹² o fibras de carbono.¹³ Esto se hace para disminuir la anisotropía, generar propiedades direccionales específicas¹⁴ o crear multimateriales.¹⁵ En términos conceptuales, un multimaterial madera-malla-adhesivo funciona como un diafragma estructural en el que la malla y el adhesivo regulan la transmisión y redistribución de tensiones,¹⁶ contribuyendo a la introducción de nuevas funcionalidades. Por su parte, investigaciones muestran que estos cambios estructurales pueden

influir significativamente en la forma en que las ondas sonoras se propagan.¹⁷ Esto evidencia que los tratamientos y las estructuras generadas modifican de una manera sistemática la anisotropía natural de la madera.^{18,19}

Los productos y compuestos que derivan de la madera, como los tableros contrachapados, la madera laminada encolada o los tableros laminados cruzados (y sus versiones reforzadas), han cobrado importancia en el campo de la ingeniería estructural gracias a su alta relación entre resistencia y peso, así como por su aporte a las estrategias para un uso eficiente de la materia prima.^{20,21} Por ejemplo, en aplicaciones constructivas contemporáneas es imprescindible caracterizar de forma fiable la resistencia estructural, lo que ha impulsado el empleo de ensayos no destructivos para estimar su rigidez y detectar heterogeneidades internas sin comprometer la integridad del material.^{22,23} Entre estas técnicas, la medición de la velocidad de propagación de ondas acústicas y ultrasónicas contribuye a la evaluación de aspectos fundamentales, tales como la uniformidad del material, el contenido de humedad y la existencia de discontinuidades. Esto ofrece información relevante para el diseño, el control de calidad y la implementación de proyectos.

El uso de refuerzos, como láminas de fibras de carbono o vidrio, fibras naturales o mallas, ha demostrado mejorar la rigidez de elementos estructurales de madera y productos laminados. En particular, la respuesta de los materiales compuestos por madera depende de cómo interactúan sus componentes y capas. Por lo tanto, los elementos que unen estos componentes son esenciales para el comportamiento de la estructura.^{20,21,22} Diversas investigaciones han demostrado que el empleo de refuerzos de polímero reforzado con fibra de carbono incrementa la resistencia y el módulo de elasticidad. Por otra parte, los refuerzos de malla contribuyen a controlar la expansión de las grietas y tienen la capacidad de reducir el consumo de materias primas.²⁴

El adhesivo actúa como elemento crítico de transferencia de esfuerzos entre la madera y el refuerzo. La eficacia de dicha transferencia depende de la condición interfacial, la penetración en la estructura porosa de la madera y parámetros de proceso. Por ejemplo, la cantidad aplicada, la presión utilizada y su formulación química determinan la falla adhesiva frente a la cohesiva.^{25,26} La literatura a menudo prioriza la evaluación del componente reforzado, sin necesariamente dirigir el análisis hacia una comparación directa y sistemática con la madera de referencia, a pesar de los progresos en optimización de refuerzos y formulaciones adhesivas.^{21,25,26}

En síntesis, la integración de un refuerzo y de una capa adhesiva en madera laminada modifica la distribución interna de rigidez y la microestructura del conjunto, por lo que la anisotropía inherente de la madera puede experimentar variaciones en magnitud y en orientación.^{1,14} Aunque metodologías avanzadas de tomografía y ensayos ultrasónicos consideran la ortotropía para mejorar la detección de defectos, la literatura presenta una carencia de estudios que cuantifiquen sistemáticamente la magnitud del cambio anisotrópico inducido por la conversión de madera maciza en un multimaterial madera-malla-adhesivo mediante comparaciones directas con la madera original.^{4,14} La cuantificación de la anisotropía acústica y su variación después de incorporar refuerzos y adhesivos puede lograrse utilizando la medición de la velocidad de onda por ultrasonido. Este método no destructivo se utiliza con protocolos de tiempo de transmisión¹ y en referencia a normas reconocidas.²⁷

Como resultado de la argumentación expuesta anteriormente, la interrogante que guía este estudio es la siguiente: ¿En qué medida la conversión de madera de *Fagus crenata* en un multimaterial compuesto por madera, malla y adhesivo modifica las velocidades de onda en las direcciones tangencial y longitudinal? Considerando el efecto de la anisotropía acústica y la influencia que la composición de un material compuesto de madera ejerce en la propagación de ondas ultrasónicas, se formula la siguiente hipótesis de trabajo: La conversión de madera de *F. crenata* en un multimaterial madera-malla-adhesivo altera significativamente el perfil de anisotropía acústica, manifestándose a través de un aumento en la velocidad ultrasónica en la dirección tangencial, una disminución en la dirección longitudinal y, en consecuencia, una reducción del coeficiente de anisotropía acústica (v_L/v_T) en comparación con la madera.

Para confirmar esta hipótesis, el objetivo de esta investigación fue medir y comparar las velocidades del ultrasonido en las direcciones tangencial y longitudinal, así como la anisotropía acústica en probetas de multimaterial que incluyen madera, malla y adhesivo, y en madera de *F. crenata*.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se prepararon dos grupos de 12 probetas cada uno. El primero consta de placas de madera de *F. crenata*, con dimensiones de 10 mm × 150 mm × 150 mm en las direcciones radial (R), tangencial (T) y longitudinal (L), respectivamente. El segundo grupo de probetas es de multimaterial madera-malla-adhesivo. Cada probeta está constituida por dos placas del mismo lote de madera de *F. crenata* (figura 1). Estas dos placas se unieron con sus direcciones de fibra principales (longitudinal y tangencial) orientadas perpendicularmente entre sí, formando una estructura de capas cruzadas con espesor total de 20 mm. La unión se realizó utilizando una combinación de dos adhesivos de poliuretano (Titebond III/ Ultimate Wood Glue, Franklin International, USA) en proporción de 50 % respecto a su peso y con distribución de 200 g/m². Entre las dos placas se posicionó una malla cuadrada (espacios de 2 mm) de acero galvanizado de 0,92 mm de espesor en el plano longitudinal-tangencial. Los tres materiales (madera, malla y adhesivo) se consolidaron con presión de 2.45 MPa y temperatura de 90 °C durante 1 h. El diseño del multimaterial combina dos estrategias de homogeneización: 1) el refuerzo con malla y adhesivo, y 2) la disposición de capas con fibras cruzadas.

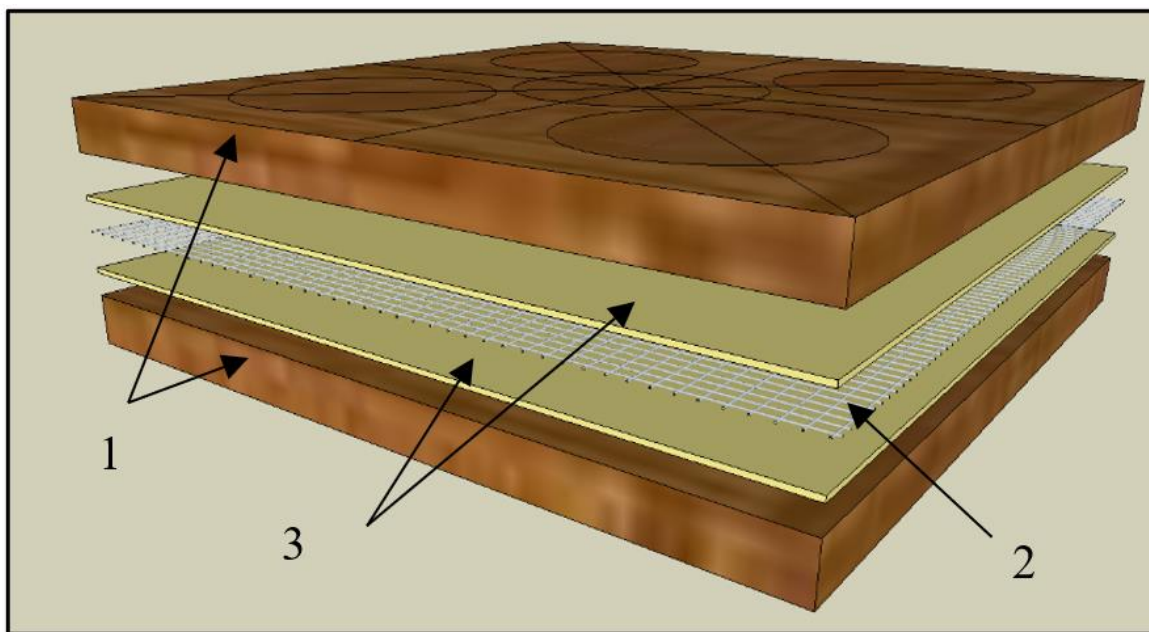


Fig. 1. Esquema de la probeta multimaterial de madera-malla-adhesivo. 1) madera, 2) malla, 3) capa de adhesivo.

Para cada probeta se determinó su contenido de humedad siguiendo las indicaciones de la norma ISO 13061-1:2014²⁸ y su densidad de acuerdo con la norma ISO 13061-2:2014²⁹. Las pruebas dinámicas enviaron un impulso ultrasónico por contacto directo en las orientaciones tangencial y/o longitudinal de la probeta¹⁹. Dado que en el multimaterial las direcciones tangencial y longitudinal de la madera se combinan, las velocidades del ultrasonido se midieron en dos posiciones A y B de las placas de madera y girando los sensores emisores y receptores paralelamente al plano correspondiente a la malla (figura 2). El tiempo de transmisión del ultrasonido se midió directamente con el instrumento Sylvatest (Frecuencia de 22000 Hz, Concept Bois Technologie, Francia) posicionado en un módulo diseñado para pruebas no destructivas (figura 3). Se realizaron tres mediciones del tiempo de transmisión y su promedio se consideró para análisis posteriores. La velocidad del ultrasonido se determinó mediante la relación entre el tiempo de transmisión y la distancia entre los sensores.

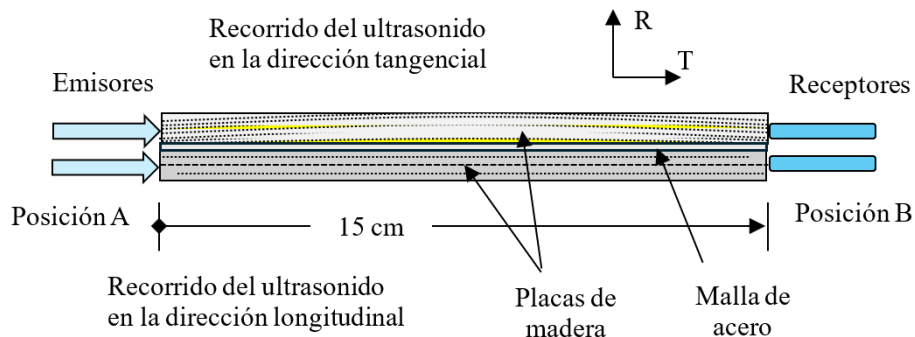


Fig. 2. Configuración de la medición de velocidad del ultrasonido en las direcciones tangencial (T) y longitudinal (L), mostrando las posiciones A y B de los sensores emisores y receptores.



Fig. 3. Montaje experimental para las pruebas de ultrasonido no destructivas con el instrumento Sylvatest.

DISEÑO EXPERIMENTAL

Se implementó un diseño experimental mixto de medidas repetidas, donde se compararon dos grupos independientes de probetas (madera vs. multimaterial) midiendo en cada una de ellas la velocidad del ultrasonido en sus dos direcciones tangencial y longitudinal, permitiendo así cuantificar no solo el efecto del tratamiento, sino también cómo este modifica específicamente el patrón direccional de propagación del ultrasonido en el material. El material experimental consistió en madera de *F. crenata* proveniente de una misma troza para minimizar la variabilidad intrínseca. Se prepararon 24 probetas, las cuales fueron acondicionadas a 20 °C y 65 % de humedad relativa hasta lograr un contenido de humedad de 10 % en la madera y en el multimaterial. Se implementó un diseño experimental de medidas repetidas. El factor inter-sujetos fue el Tratamiento, con dos niveles: Grupo Control: Madera ($n = 12$) y Grupo Experimental: Multimaterial ($n = 12$). Las variables de respuesta fueron la densidad (ρ) y la velocidad de onda (v). Para cada probeta, la velocidad de onda se midió bajo el factor intra-sujeto de dirección de medición, con dos niveles: Tangencial (T) y Longitudinal (L). Adicionalmente, se calculó el coeficiente de anisotropía acústica como la razón v_L/v_T para cada probeta.

Se calcularon los estadísticos descriptivos: media (μ), desviación estándar (σ) y coeficiente de variación en por ciento ($CV = \sigma/\mu$). Para el análisis estadístico ($\alpha = 0.05$) se comparó la densidad entre los dos grupos de tratamiento mediante un análisis de varianza de una vía, previa verificación de los supuestos de normalidad (Shapiro-Wilk) y homocedasticidad (Levene). Se analizó la velocidad de onda con un análisis

de varianza de medidas repetidas para evaluar los efectos principales del tratamiento, la dirección y su interacción (Tratamiento x Dirección). Se comparó el coeficiente de anisotropía entre los dos grupos de tratamiento mediante una Prueba t de Student para muestras independientes, verificando previamente los supuestos correspondientes. La hipótesis nula postula que el tratamiento no modifica significativamente la densidad, las velocidades de onda ni el coeficiente de anisotropía, frente a la hipótesis alternativa que afirma la existencia de una modificación significativa.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente estudio se evaluaron los efectos de la transformación de madera de *F. crenata* en un multimaterial compuesto por madera, malla metálica y adhesivo de poliuretano. El análisis experimental se centró en las propiedades físicas y acústicas de la madera, con especial énfasis en el comportamiento anisotrópico del multimaterial. La caracterización incluyó la determinación de densidad, velocidad del ultrasonido en direcciones tangencial y longitudinal, y el cálculo del coeficiente de anisotropía acústica correspondiente.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos mediante análisis estadísticos que incluyen estadísticos descriptivos para cada variable medida (tabla I) y análisis de varianza para determinar la significancia estadística de las diferencias observadas entre grupos (tabla II) y direcciones de medición (tabla III). Los análisis inferenciales implementados comprenden pruebas de homocedasticidad y tamaños del efecto para cuantificar la magnitud de las diferencias detectadas.

Tabla I Propiedades físicas y velocidad del ultrasonido: estadísticos descriptivos comparando madera de *F. crenata* y el multimaterial madera-malla-adhesivo.

Variable	Grupo	Estadístico		
		μ	σ	CV
Densidad (kg/m^3)	Multimaterial	667.4	13.9	2.1
	Madera	645.8	20.5	3.2
Velocidad Tangencial (m/s)	Multimaterial	3157.5	716.5	22.7
	Madera	1653.2	81.7	4.9
Velocidad Longitudinal (m/s)	Multimaterial	3903.6	688.5	17.6
	Madera	5248.3	410.7	7.8
Coeficiente de Anisotropía acústica (v_L/v_T)	Multimaterial	1.29	0.39	30.0
	Madera	3.18	0.31	9.9

Tabla II. Análisis de varianza de una vía comparando el efecto del tratamiento multimaterial en la densidad del material compuesto.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	Valor p	Tamaño del efecto (η^2)
Entre grupos	2799.36	1	2799.36	9.166	0.006	0.295
Dentro de grupos	6719.20	22	305.42			
Total	9518.56	23				

Tabla III. Análisis de varianza factorial 2x2 evaluando los efectos del tratamiento y dirección de medición en la velocidad del ultrasonido.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	Valor p	Tamaño del efecto (η^2)
Tratamiento (A)	76480.32	1	76480.32	0.263	0.610	0.001
Dirección (B)	56537104.32	1	56537104.32	194.5	<0.001	0.603
Interacción (A x B)	24350400.00	1	24350400.00	83.76	<0.001	0.260
Error	12789190.00	44	290663.41			
Total	93753174.64	47				

Efecto del tratamiento en la densidad y las velocidades de onda

Los resultados descriptivos (tabla I) y la prueba inferencial para la densidad muestran que la transformación de la madera de *F. crenata* en el multimaterial (incorporación de malla y adhesivo) produjo un incremento en la densidad media del conjunto de probetas. El análisis de varianza de una vía (tabla II) indicó una diferencia estadísticamente significativa en densidad entre los grupos ($F = 9.166$, $p = 0.006$); el tamaño del efecto (η^2) indica que una proporción sustancial de la variabilidad total de densidad se asocia al tratamiento ($\eta^2 \approx 0.295$). La prueba de Levene ($p = 0.342$) soporta el supuesto de homocedasticidad utilizado para el análisis de varianza.

Desde la perspectiva de la ciencia de materiales, el aumento de densidad observado en el multimaterial es coherente con la introducción de componentes de mayor densidad volumétrica (adhesivo de poliuretano y la propia malla de refuerzo) y con la posible compactación o impregnación local de la matriz lignocelulósica en el proceso de fabricación. Un aumento de la densidad macroscópica suele correlacionar con un incremento de rigidez en ciertos modos de deformación; sin embargo, la relación entre densidad y velocidad ultrasónica no es necesariamente lineal ni unívoca, porque la velocidad de onda depende tanto de la densidad como de los módulos elásticos del multimaterial.^{17,18}

Los estadísticos descriptivos muestran que la velocidad ultrasónica en la dirección tangencial aumentó en promedio en las probetas de multimaterial respecto a la madera, mientras que la velocidad en la dirección longitudinal mostró, en promedio, una reducción en el multimaterial respecto a la madera (figura 4). Por tanto, la transformación no produce un incremento homogéneo de velocidad en todas las direcciones: la dirección tangencial se rigidiza (o al menos la velocidad aumenta), y la dirección longitudinal tiende a disminuir su velocidad. Esta diferencia direccional sugiere que la contribución mecánica de la malla y el adhesivo es anisótropa y que la integración de las fases altera selectivamente las rutas de transmisión de ondas y la rigidez en cada dirección.

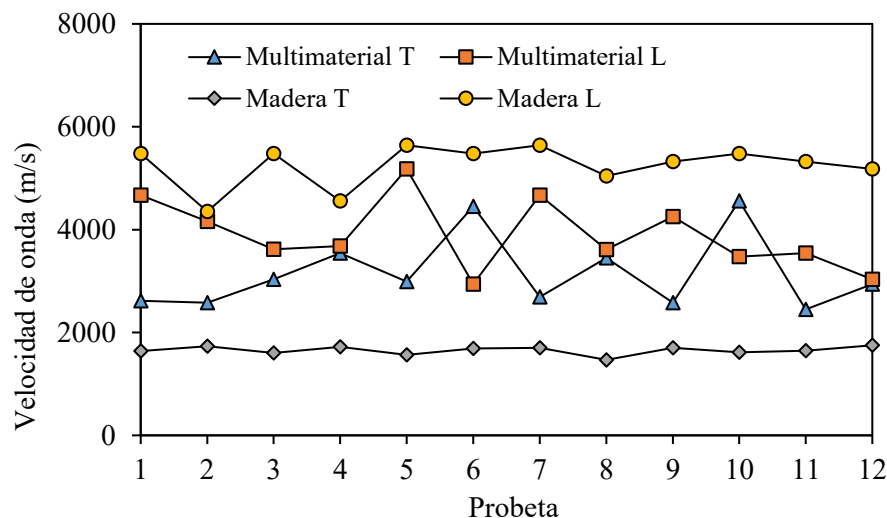


Fig. 4. Variación de la velocidad de onda.

La figura 4 muestra cómo cambia el perfil anisotrópico del material después del tratamiento, destacando un cambio importante tanto en las magnitudes como en la dirección de las velocidades ultrasónicas. La interacción significativa entre el tratamiento y la dirección ($F = 83.76$, $p < 0.001$) se traduce en un comportamiento divergente: un incremento del 91 % en la velocidad tangencial y una disminución del 26 % en la velocidad longitudinal. Este patrón muestra que transformar la madera en un multimaterial modifica la rigidez de manera específica, alterando su naturaleza anisotrópica original.

Físicamente, esto puede interpretarse así: la adición de la malla y el adhesivo proporciona un refuerzo transversal o de corte que incrementa la velocidad de onda tangencial, es decir, incrementa la rigidez en la dirección tangencial, mientras que la continuidad y estructura natural de las fibras en la dirección

longitudinal podría verse alterada por discontinuidades introducidas, adhesivos o tensiones residuales, lo que reduce la velocidad en la dirección longitudinal. En resumen, aunque el aumento de densidad es compatible con cambios en la velocidad, los signos opuestos en las direcciones tangencial y longitudinal indican que la microestructura y la arquitectura del multimaterial dominan la respuesta ultrasónica más que un simple efecto de densidad.

Anisotropía acústica del material y efecto de la interacción

La anisotropía acústica de la madera y del multimaterial se evaluó cuantificando el coeficiente v_L/v_T y mediante el análisis de varianza factorial (Tratamiento $\times$ Dirección). Los estadísticos descriptivos de v_L/v_T muestran que las probetas de madera tienen un coeficiente v_L/v_T notablemente superior indicando una velocidad longitudinal mucho mayor que la tangencial (tabla I), con menor variabilidad relativa. Por el contrario, el multimaterial presenta un coeficiente v_L/v_T mucho más cercano a la unidad y con mayor variabilidad relativa (figura 5). Este resultado puede ser atribuido a las heterogeneidades que se introdujeron durante el proceso de fabricación, tales como la distribución no uniforme del adhesivo o el inadecuado acomodo de la malla. Estos perfiles sugieren que la madera conserva la anisotropía típica de la madera (Longitudinal $\gg$ Tangencial), mientras que el multimaterial tiende a atenuar esa anisotropía, acercando las velocidades en ambas direcciones¹⁴.

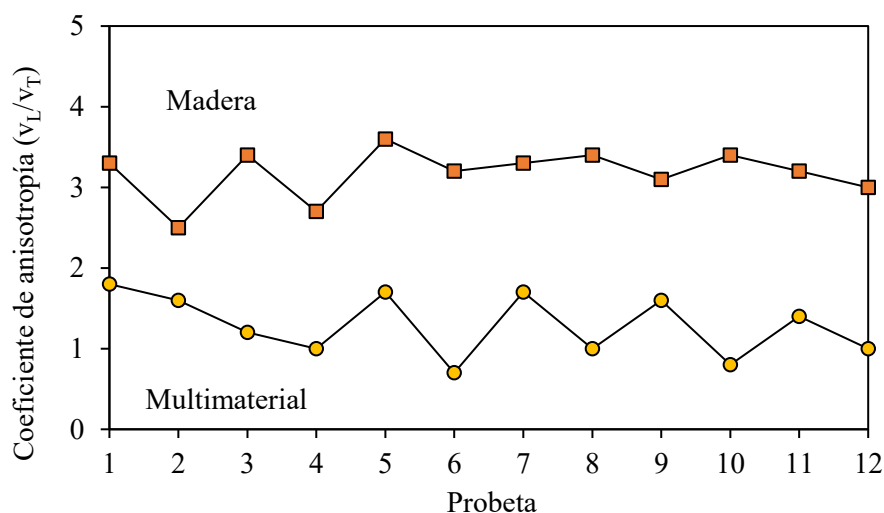


Fig. 5. Variación del coeficiente de anisotropía.

La figura 5 cuantifica la reducción de la anisotropía acústica, evidenciada por la disminución del coeficiente v_L/v_T de 3.18 en la madera original a 1.29 en el multimaterial (tabla I). Este acercamiento a la unidad indica una tendencia hacia la isotropía y confirma el cumplimiento del objetivo experimental. La uniformidad de las propiedades se debe a la interacción importante entre el tratamiento y la dirección ($p < 0.001$). La adición de refuerzos en capas cruzadas ayuda a redistribuir la rigidez interna del multimaterial. El material deja de tener una dirección marcada y adopta un comportamiento más equilibrado en su estructura y acústica, típico de una configuración optimizada que utiliza varios materiales.

El análisis de varianza de dos vías muestra que la dirección es un factor significativo ($F \approx 194.512$, $p < 0.001$; $\eta^2 \approx 0.603$), lo que confirma, con evidencia estadística robusta, la existencia de anisotropía en el conjunto de datos (tabla III). Es decir, se obtienen velocidades diferentes según la dirección de medición. La interacción Tratamiento $\times$ Dirección es también altamente significativa ($F \approx 83.776$, $p < 0.001$; $\eta^2 \approx 0.260$). La presencia de esta interacción significativa implica que el efecto del tratamiento sobre la velocidad depende de la dirección: en otras palabras, la transformación a multimaterial modifica diferencialmente las velocidades tangencial y longitudinal. Es decir, altera el grado y la naturaleza de la anisotropía acústica.

Un coeficiente v_L/v_T mayor que la unidad indica que la rigidez y la continuidad de las fibras favorecen la transmisión de ondas en la dirección longitudinal. Cuanto mayor es este coeficiente, mayor es la discrepancia en la respuesta del material entre las direcciones Longitudinal y Tangencial. En este estudio, las probetas de madera poseen un coeficiente v_L/v_T alto, lo que implica que su comportamiento elástico es fuertemente direccional. El multimaterial presenta un coeficiente v_L/v_T próximo a la unidad en varias probetas y media notablemente menor que el de la madera, lo que demuestra una mayor isotropía relativa en cuanto a velocidades ultrasónicas, resultado que concuerda con la incorporación de fases (adhesivo y malla) que redistribuyen rigidez y atenúan la dominancia de la dirección de fibra.

La interacción significativa (Tratamiento $\times$ Dirección) cuantifica que el tratamiento no sólo desplaza valores medios, sino que reconfigura la relación entre direcciones: la diferencia de velocidades entre las direcciones longitudinal y tangencial se reduce en el multimaterial, lo que significa que la anisotropía se atenúa de manera estadísticamente significativa por el tratamiento ($p < 0.001$ y η^2 Interacción ≈ 0.260 indica un efecto de magnitud grande). Desde un punto de vista de aplicación, esto implica que el multimaterial puede comportarse de forma más balanceada frente a ondas mecánicas y posiblemente frente a ciertos modos de carga.

El hallazgo más significativo de este estudio es que la transformación de madera en un multimaterial compuesto por madera, malla y adhesivo altera fundamentalmente su comportamiento acústico y mecánico, reduciendo drásticamente su anisotropía natural. Este cambio se manifiesta a través de una interacción estadísticamente significativa entre el tipo de material y la dirección de medición de la velocidad ultrasónica, lo que confirma que el tratamiento no modifica las propiedades de manera uniforme, sino que redefine el patrón direccional de respuesta del material.²²

La velocidad del ultrasonido en la dirección longitudinal disminuyó notablemente en el multimaterial. Aproximadamente un 25.6 % respecto a la madera. Esta reducción puede atribuirse a la interrupción de la continuidad estructural de las fibras del material. En la madera, la orientación de las fibras constituye una vía eficiente para la propagación de ondas longitudinales. La incorporación de la malla y la matriz polimérica del adhesivo introduce interfaces materiales y discontinuidades que actúan como dispersores de onda, aumentando la atenuación y reduciendo la velocidad de propagación en esta dirección.³⁰

Por el contrario, el aumento de la velocidad en la dirección tangencial, que fue un 91 % superior en el multimaterial, sugiere un efecto de refuerzo transversal inducido por los componentes añadidos. La malla de naturaleza metálica y el adhesivo de poliuretano, que forman una matriz continua, parecen conferir una rigidez adicional al material en direcciones donde la madera es inherentemente más débil y menos rígida. Este refuerzo en el plano tangencial restringe el movimiento y aumenta el módulo elástico en esa dirección, facilitando una transmisión más rápida de las ondas ultrasónicas.

Al contextualizar estos hallazgos dentro de la literatura existente, los resultados concuerdan con estudios previos sobre composites que incorporan refuerzos en matrices naturales. Se ha documentado que la adición de fases discontinuas o mallas en un sustrato anisotrópico tiende a homogenizar sus propiedades mecánicas²⁴. Sin embargo, este estudio cuantifica de manera precisa cómo esta homogeneización se traduce en una alteración del perfil de velocidades ultrasónicas (figura 4) y, por ende, de la anisotropía (figura 5). El coeficiente de anisotropía acústica resultante, que se redujo de 3.18 en la madera a 1.29 en el multimaterial, corrobora esta transición hacia un comportamiento más isótropo, un fenómeno reportado en composites pero menos cuantificado en multimateriales basados en madera³¹.

Las implicaciones de este trabajo son considerables para el diseño de materiales de base biológica. Disponer de un material derivado de la madera con un comportamiento más isótropo abre la puerta a aplicaciones donde las cargas estructurales son multidireccionales y la anisotropía extrema de la madera constituye una limitación. Por ejemplo, en componentes para la industria automotriz, mobiliario estructural o paneles de construcción, un material con propiedades mecánicas más homogéneas en diferentes direcciones puede ofrecer un rendimiento más predecible y una mayor resistencia a cargas complejas fuera de su eje principal.

No obstante, este estudio presenta limitaciones que deben ser reconocidas. El análisis se centró en un único tipo de malla y adhesivo, y en una configuración específica de fabricación. Además, la evaluación se limitó a las propiedades dinámicas inferidas mediante ultrasonidos, sin correlacionarlas directamente con

ensayos mecánicos destructivos para determinar propiedades como los módulos de elasticidad o la resistencia última en diferentes direcciones. Futuras investigaciones deberían explorar sistemáticamente el efecto de variables como la geometría y material de la malla, el tipo de adhesivo formador de la matriz, la orientación de las capas de madera y los parámetros del proceso de fabricación. Asimismo, se recomienda realizar una caracterización mecánica completa y un análisis microestructural detallado para establecer relaciones microestructura-propiedad más robustas y comprender los mecanismos de refuerzo y la eficiencia de la interfaz material en este multimaterial.

CONCLUSIONES

La transformación de madera de *F. crenata* en un multimaterial compuesto por madera, malla metálica y adhesivo de poliuretano modificó su densidad y su comportamiento dinámico frente a ondas ultrasónicas. El refuerzo transversal proporcionado por la malla y la matriz adhesiva incrementó en promedio un 91 % la velocidad en dirección tangencial, mientras que en dirección longitudinal se registró una disminución del 26 %, atribuida a la interrupción de la continuidad natural de las fibras. Este contraste evidencia que la introducción de fases adicionales altera de manera diferenciada las propiedades según la orientación anatómica de la madera.

Como resultado de estas modificaciones, la anisotropía acústica del material se redujo de forma notable: el coeficiente de anisotropía longitudinal/tangencial pasó de 3.18 en la madera a 1.29 en el multimaterial. Esta disminución confirma que la incorporación de refuerzos heterogéneos y adhesivos tiene un efecto homogeneizador en la propagación de ondas, confiriendo al material un comportamiento más isotrópico. El análisis estadístico corroboró que los efectos de la transformación no se limitan a cambios en los valores medios, sino que reconfiguran la naturaleza misma de la anisotropía acústica, con una interacción tratamiento-dirección altamente significativa.

Desde la perspectiva de aplicaciones en ingeniería de materiales, estos hallazgos muestran el potencial de los multimateriales lignocelulósicos en contextos donde la homogeneidad de propiedades es deseable, como en elementos estructurales y componentes de mobiliario. Sin embargo, se reconoce que los resultados se circunscriben a una configuración específica de refuerzo y adhesivo. Por ello, futuras investigaciones deberán explorar variaciones en la geometría de la malla, la naturaleza de los adhesivos y el proceso de consolidación, además de establecer correlaciones entre las propiedades dinámicas ultrasónicas y el desempeño mecánico y microestructural global.

REFERENCIAS

1. L. Espinosa, L. Brancheriau, Y. Cortes, F. Prieto, and P. Lasaygues, "Ultrasound computed tomography on standing trees: accounting for wood anisotropy permits a more accurate detection of defects," *Ann. For. Sci.*, vol. 77, p. 68, 2020. doi: 10.1007/s13595-020-00971-z.
2. G. Manzo, J. Tippner, and P. Zatloukal, "Relationships Between the Macrostructure Features and Acoustic Parameters of Resonance Spruce for Piano Soundboards," *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 4, p. 1749, 2021. doi: 10.3390/app11041749.
3. I. Brémaud, J. Gril, and B. Thibaut, "Anisotropy of Wood Vibrational Properties: Dependence on Grain Angle and Review of Literature Data," *Wood Sci. Technol.*, vol. 45, no. 4, pp. 735-754, 2011. doi: 10.1007/s00226-010-0393-8.
4. L. P. Perlin, R. C. de Andrade Pinto, and A. do Valle, "Ultrasonic tomography in wood with anisotropy consideration," *Constr. Build. Mater.*, vol. 229, Art. no. 116958, 2019. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116958.
5. V. Bucur, "A Review on Acoustics of Wood as a Tool for Quality Assessment," *Forests*, vol. 14, no. 8, p. 1545, 2023. doi: 10.3390/f14081545.
6. J. Mackerle, "Finite Element Analyses in Wood Research: A Bibliography," *Wood Sci. Technol.*, vol. 39, no. 7, pp. 579-600, 2005. doi: 10.1007/s00226-005-0026-9.
7. N. Tankut, A. N. Tankut, and M. Zor, "Finite Element Analysis of Wood Materials," *Drv. Ind.*, vol. 65, no. 2, pp. 159-171, 2014. doi: 10.5552/drind.2014.1254.

8. L. Acuña, R. Martínez, E. Spavente, M. Casado, J. Álvarez-Martínez, C. O'Ceallaigh, A. M. Harte, and J.-A. Balmori, "Modulus of Elasticity Prediction Through Transversal Vibration in Cantilever Beams and Ultrasound Technique of Different Wood Species," *Constr. Build. Mater.*, vol. 371, Art. no. 130750, 2023. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130750.
9. P. Niemz and D. Mannes, "Non-Destructive Testing of Wood and Wood-Based Materials," *J. Cult. Herit.*, vol. 13, no. 3, Supplement, pp. S26-S34, 2012. doi: 10.1016/j.culher.2012.04.001.
10. L. Kristak, I. Kubovský, and R. Réh, "New Challenges in Wood and Wood-Based Materials," *Polymers*, vol. 13, no. 15, p. 2538, 2021. doi: 10.3390/polym13152538.
11. L. Kristak, R. Réh, and I. Kubovský, "New Challenges in Wood and Wood-Based Materials II," *Polymers*, vol. 15, no. 6, p. 1409, 2023. doi: 10.3390/polym15061409.
12. A. Toğay, N. Döngel, C. Söğütü, E. Ergin, M. Uzel, and S. Güneş, "Determination of the Modulus of Elasticity of Wooden Construction Elements Reinforced with Fiberglass Wire Mesh and Aluminum Wire Mesh," *BioResources*, vol. 12, no. 2, pp. 2466-2478, 2017. doi: 10.15376/BIORES.12.2.2466-2478.
13. C. A. Abade Bertolino, N. T. Mascia, C. D. Basaglia, and B. Fazendeiro Donadon, "Analysis of Fiber Reinforced Laminated Timber Beams," *Key Eng. Mater.*, vol. 668, pp. 100-109, 2015. doi: 10.4028/www.scientific.net/kem.668.100.
14. D. Faktorová, M. D. Stanciu, M. Krbata, A. Savin, M. Kohutiar, M. Chlada, et al., "Analysis of the anisotropy of sound propagation velocity in thin wooden plates using Lamb waves," *Polymers*, vol. 16, no. 6, p. 753, 2024. doi: 10.3390/polym16060753.
15. H. Rangavar, "Wood-Cement Board Reinforced with Steel Nets and Woven Hemp Yarns: Physical and Mechanical Properties," *Drv. Ind.*, vol. 68, no. 2, pp. 121-128, 2017. doi: 10.5552/drind.2017.1633.
16. J. R. Sotomayor Castellanos and I. Macedo Alquicira, "Vibraciones transversales para determinar el módulo dinámico e índice material en multimaterial de madera-malla-adhesivo en *Fagus crenata*," *Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica*, vol. 11, no. 63, pp. 39-62, 2023.
17. É. Hillig, I. Bobadilla, F. Arriaga, and G. Íñiguez-González, "Using Acoustic Testing to Estimate Strength and Stiffness of Wood-Polymer Composites," *Maderas. Cienc. Tecnol.*, vol. 26, pp. 1-16, 2024. doi: 10.22320/s0718221x/2024.04.
18. I. Macedo Alquicira and J. R. Sotomayor Castellanos, "Velocidades del ultrasonido y módulos dinámicos de madera sólida, laminada y multimaterial de *Pinus pseudostrobus* Lindl.," in *Proc. XXVII Congreso Internacional Anual de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica*, México, 2021, pp. 56-64.
19. J. R. Sotomayor Castellanos and I. Macedo Alquicira, "Caracterización por ultrasonido del multimaterial madera-malla-adhesivo," *Prisma Tecnol.*, vol. 16, no. 1, pp. 24-30, 2025. doi: 10.33412/pri.v16.1.3972.
20. A. N. Papadopoulos, "Advances in wood composites," *Polymers*, vol. 12, no. 1, p. 48, 2019. doi: 10.3390/polym12010048.
21. K. Saal, H. Kallakas, E. Tuhkanen, A. Just, A. Rohumaa, J. Kers, et al., "Fiber-Reinforced Plywood: Increased Performance with Less Raw Material," *Materials*, vol. 17, no. 13, p. 3218, 2024. doi: 10.3390/ma17133218.
22. N. Pahnabi, T. Schumacher, and A. Sinha, "Imaging of Structural Timber Based on In Situ Radar and Ultrasonic Wave Measurements: A Review of the State-of-the-Art," *Sensors*, vol. 24, no. 9, p. 2901, 2024. doi: 10.3390/s24092901.
23. E. G. Mason, M. Hayes, and N. Pink, "Validation of ultrasonic velocity estimates of wood properties in discs of radiata pine," *New Zealand Journal of Forestry Science*, vol. 47, Art. no. 16, 2017. doi: 10.1186/s40490-017-0098-y.
24. A. Wdowiak-Postulak, "Strengthening of Structural Flexural Glued Laminated Beams of Ashlar with Cords and Carbon Laminates," *Materials*, vol. 15, no. 23, p. 8303, 2022. doi: 10.3390/ma15238303.
25. C. H. Lee, A. Khalina, and S. H. Lee, "Importance of interfacial adhesion condition on characterization of plant-fiber-reinforced polymer composites: A review," *Polymers*, vol. 13, no. 3, p. 438, 2021. doi: 10.3390/polym13030438.

26. Y. Amin et al., "Effect of glue spread on bonding strength, delamination, and wood failure of jabon wood-based cross-laminated timber using cold-setting melamine-based adhesive," *Polymers*, vol. 15, no. 10, p. 2349, 2023. doi: 10.3390/polym15102349.
27. ASTM E494-20, Standard Practice for Measuring Ultrasonic Velocity in Materials. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020.
28. 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, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2014.
29. ISO 13061-2:2014, Physical and Mechanical Properties of Wood - Test Methods for Small Clear Wood Specimens. Part 2: Determination of Density for Physical and Mechanical Tests, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2014.
30. F. Bockel, A. Harling, G. Grönquist, and A. Niemz, "Characterization of wood-adhesive bonds in wet conditions by means of nanoindentation and tensile shear strength," *Eur. J. Wood Wood Prod.*, vol. 78, no. 3, pp. 449–459, 2020, doi: 10.1007/s00107-020-01520-1.
31. X. Zhang, F. Dubois, N. Sauvat, V. T. N. Tran, J. R. Lee, and J.-C. Dupré, "Hybrid numerical method for the ultrasonic wave propagation velocity in orthotropic materials," *Wood Sci. Technol.*, vol. 56, pp. 1605–1630, 2022, doi: 10.1007/s00226-022-01416-8.