

Caracterización por ultrasonido del multimaterial madera-malla-adhesivo

Javier Ramón Sotomayor Castellanos¹ , Israel Macedo Alquicira² 

¹ y ² Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México.

Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera.

¹ maderas99@yahoo.com, ² macedoisrael@gmail.com

DOI: 10.33412/pri.v16.1.3972



Resumen: La hipótesis de la investigación propone que la densidad, la velocidad del ultrasonido y el módulo dinámico de la madera sólida se incrementan como efecto de su transformación en un multimaterial constituido con madera-malla-adhesivo. Para verificar esta propuesta, el objetivo de la investigación fue determinar estos tres parámetros en probetas de pequeñas dimensiones de *Pinus pseudostrobus*, *Tabebuia rosea* y *Quercus scytophylla*. Con madera de las mismas especies se prepararon dos grupos de probetas, uno de madera sólida y otro de multimaterial. Se determinó su contenido de humedad y su densidad, también se realizaron mediciones de la velocidad del ultrasonido y se calcularon los módulos dinámicos. Se analizaron los resultados probeta por probeta de una misma especie, su anisotropía y se calcularon las correlaciones estadísticas entre las variables de respuesta. Igualmente, se analizó el efecto de las mallas en los resultados promedio. La densidad, la velocidad del ultrasonido y el módulo dinámico de la madera sólida aumentan por la elaboración del multimaterial. En cambio, en el multimaterial, disminuye su variabilidad y anisotropía. La malla y el adhesivo funcionan como componentes estabilizadores en el multimaterial, por lo que en este disminuye la magnitud de la velocidad longitudinal, pero aumenta la tangencial. La densidad no es un buen predictor de la velocidad del ultrasonido. En cambio, es un predictor moderado del módulo dinámico.

Palabras clave: Anisotropía, contenido de humedad, densidad, módulo dinámico, velocidad del ultrasonido.

Title: Characterization by ultrasound of the wood-mesh-adhesive multimaterial.

Abstract: The research hypothesis proposes that the density, the speed of the ultrasound and the dynamic modulus of solid wood increase as an effect of its transformation into a multimaterial made up of wood-mesh-adhesive. To verify this proposal, the objective of the research was to determine these three parameters in small specimens of *Pinus pseudostrobus*, *Tabebuia rosea* and *Quercus scytophylla*. With wood of the same species, two groups of test tubes were prepared, one of solid wood

and the other of multimaterial. Its moisture content and density were determined, ultrasound velocity measurements were also made and dynamic moduli were calculated. The results were analyzed specimen by specimen of the same species, its anisotropy and the statistical correlations between the response variables were calculated. Likewise, the effect of the meshes on the average results was analyzed. The density, the speed of the ultrasound and the dynamic modulus of solid wood are increased by the processing of the multimaterial. On the other hand, in the multimaterial, its variability and anisotropy decrease. The mesh and the adhesive function as stabilizing components in the multimaterial, so the magnitude of the longitudinal velocity decreases in it, but the tangential velocity increases. Density is not a good predictor of ultrasound speed. Instead, it is a moderate predictor of the dynamic modulus.

Key words: Anisotropy, density, dynamic modulus, moisture content, ultrasound speed.

Tipo de artículo: investigación.

Fecha de recepción: 13 de diciembre de 2023.

Fecha de aceptación: 20 de febrero de 2025.

1. Introducción

En tecnología de la madera, una propuesta contemporánea es la modificación de sus propiedades intrínsecas aplicando procesos de densificado, plastificado y/o de preservación para optimizar su aprovechamiento industrial [1]. Este enfoque tiene por objetivo mejorar sus propiedades tecnológicas y reducir su heterogeneidad, anisotropía y tendencia al deterioro. La anisotropía de la madera se define como la variabilidad en la magnitud de sus propiedades físicas, en función de la dirección de medición o de observación. Las direcciones radial, tangencial y longitudinal son privilegiadas en relación con el plano leñoso. Esta propiedad se manifiesta igualmente en las diversas escalas de observación de la organización jerárquica de la madera. Todas estas son características naturales de la materia prima que se obtiene de una amplia biodiversidad de especies forestales [2].

Una segunda tendencia es el desarrollo de compuestos y de madera de ingeniería con la finalidad de transitar del uso de la madera como materia prima, a su empleo como material de ingeniería [3]. Estos materiales tienen características físicas y mecánicas bien definidas tales como su densidad, sus coeficientes de hidroscofia, su módulo de elasticidad, así como su resistencia a la ruptura. De tal forma, que se pueden comercializar en el mercado como productos industriales o insumos normalizados para el cálculo ingenieril y en el diseño arquitectónico, así como en las industrias que requieren que la madera y sus materiales derivados estén caracterizados [4]. Esta estrategia permite al ingeniero y arquitecto disponer de un material que puede competir con otros insumos en el mercado [5].

En esta investigación se presenta la caracterización mecánica de un multimaterial compuesto de madera sólida, malla y adhesivo. Este multimaterial puede tener aplicaciones como sustituto y/o complemento de elementos estructurales y arquitecturales [6]. Se elaboró con las maderas *Pinus*

pseudostrobus, *Tabebuia rosea* y *Quercus scytophylla*, las cuales son utilizadas en la industria de transformación como materia prima para elaborar madera aserrada y tableros contrachapados y aglomerados de fibra y astilla [7] [8]. Sin embargo, existe poca información acerca de su transformación en un multimaterial con vocación constructiva.

En [9] [10] se reportan estudios con ultrasonido de multimaterial madera-malla-adhesivo con un acomodo paralelo de sus láminas. Los autores citados determinaron densidades, velocidades del ultrasonido y módulos dinámicos para madera sólida, madera laminada y multimaterial de *P. pseudostrobus*. No obstante, los resultados de la presente investigación son originales e inéditos.

La hipótesis de la investigación propone que la densidad, la velocidad del ultrasonido y el módulo dinámico de la madera sólida se incrementan como efecto de su transformación en un multimaterial madera-malla-adhesivo. Para verificar esta propuesta, el objetivo de la investigación fue determinar estos tres parámetros en probetas de pequeñas dimensiones de *P. pseudostrobus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla* y de multimaterial elaborado con estas mismas especies.

2. Materiales y métodos

Se prepararon seis grupos de 17 probetas cada uno. Tres de ellos son de madera sólida de *P. pseudostrobus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla* con dimensiones de 10 mm × 150 mm × 150 mm en las direcciones radial (R), tangencial (T) y longitudinal (L), respectivamente. Los otros tres grupos están formados por probetas de multimaterial madera-malla-adhesivo, las cuales están constituidas por dos placas de madera de las mismas especies, con dimensiones de 20 mm × 150 mm × 150 mm (figura 1). Estas dos placas están unidas ortogonalmente en las direcciones tangencial y longitudinal con una combinación de dos componentes de adhesivo de poliuretano repartidos 200 kg m⁻². Entre las dos placas se posicionó una malla de acero galvanizado en el plano longitudinal-tangencial. Los tres materiales se consolidaron con presión de 250 kg m⁻² y temperatura de 90 °C durante 1 h.

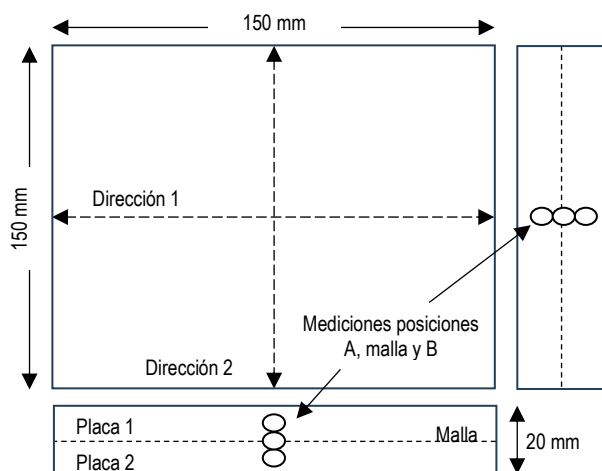


Figura 1. Probeta de multimaterial.

Los taxones botánicos de las maderas se determinaron en la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México.

Para cada muestra se determinó su contenido de humedad (CH) [11] y su densidad (ρ_{CH}) [12]. Se realizaron mediciones de la velocidad del ultrasonido [13] en las direcciones tangencial y longitudinal de la madera sólida. Las pruebas de ultrasonido consistieron en suministrar un impulso ultrasónico en transmisión directa en dirección tangencial y/o longitudinal de la probeta. El tiempo de transmisión del ultrasonido se midió directamente con el aparato *SylvatestDuo*® (Frecuencia de 22000 Hz) posicionado en un dispositivo diseñado especialmente para pruebas no destructivas (figura 2).



Figura 2. Pruebas de ultrasonido.

Dado que en el multimaterial las direcciones tangencial y longitudinal de la madera se combinan, las velocidades del ultrasonido se midieron en las posiciones A y B de las placas de madera y paralelamente al plano correspondiente a la malla (figura 1). Igualmente, se midieron las velocidades del ultrasonido a través de la malla en su dirección paralela al plano principal. A partir de la ecuación de onda (1) [14]:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1)$$

Donde:

u = Vector desplazamiento

x = Coordenada espacial

t = Coordenada temporal

v = velocidad de onda

Los módulos dinámicos se calcularon con (2) [15]:

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

Donde:

E_{us} = Módulo dinámico (N m⁻²)

ρ_{CH} = Densidad (kg m⁻³)

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

2.1. Diseño experimental

Se estudiaron seis unidades experimentales, tres de la madera sólida y tres del multimaterial, y cada unidad se formó por grupos de 17 probetas. La transformación de madera sólida de cada especie en multimaterial se considera el factor de variación. Las variables de respuesta fueron la densidad (ρ_{CH}), la velocidad del ultrasonido (v_{us}) y el módulo dinámico (E_{us}). Así, se formaron 18 muestras independientes y homogéneas (2 tipos de material: madera sólida y multimaterial por tres especies: *P. pseudostrobus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla* por tres variables de respuesta). De tal forma, se diseñó un experimento homogéneo, aleatorio y balanceado [16].

La estrategia experimental consistió en medir la velocidad del ultrasonido en las posiciones A, malla y B del multimaterial (Figura 1). De esta forma se pudo analizar de manera local el efecto de la matriz malla-adhesivo sobre el ultrasonido en las placas de madera. Sin embargo, para observar el efecto integral, se tomaron como valores el promedio de estas tres mediciones.

Para cada muestra se calcularon su media (μ), su desviación estándar (σ) y su coeficiente de variación ($CV = \sigma/\mu$). Se realizaron pruebas de normalidad de la distribución de las muestras calculando el sesgo estandarizado (SE) y el apuntamiento estandarizado (AE) con el criterio de demarcación de aceptar distribuciones uniformes para valores al interior del intervalo $[-2 < SE \text{ y/o } AE < +2]$. Para los datos de las velocidades del ultrasonido, se realizaron pruebas de verificación y análisis de varianza y de grupos homogéneos con la hipótesis nula: $H_0: \mu_1 = \mu_2$ donde los subíndices 1 y 2 se refieren a las muestras en contrastación. Las pruebas estadísticas se realizaron para un nivel de confianza de 95%. Así, el criterio de demarcación fue aceptar diferencias significativas para valores de $P_{(\alpha = 0,05)} < 0,05$. Para observar el efecto del tratamiento en cada una de las placas que forman el multimaterial, se realizaron las mismas pruebas anteriores, pero para las mediciones correspondientes a las direcciones 1 y 2 (figura 1).

3. Resultados y discusión

Los resultados y su discusión detallan el análisis estadístico que corroboró la normalidad de la distribución de las muestras, así como una distinción entre las mediciones efectuadas en madera sólida en comparación con la laminada. Asimismo, se analizan detalladamente los hallazgos obtenidos en relación con la densidad, la velocidad del ultrasonido y el módulo dinámico.

3.1. Análisis estadístico

Las pruebas de normalidad para las mediciones del ultrasonido en las direcciones 1 y 2 verifican la distribución normal de las muestras de las tres especies. En el mismo contexto, la

verificación de la varianza y su análisis indican que no existen diferencias estadísticamente significativas. Con excepción de *P. pseudostrobus*, el análisis Anova indica que no hay diferencias significativas y como consecuencia sus grupos son homogéneos.

Como corolario, la prueba de grupos homogéneos no distingue las medidas entre las direcciones 1 y 2, las cuales corresponden a las direcciones tangencial y longitudinal de la madera de las placas, e indica que las propiedades de anisotropía de la madera se equilibran. Debido a este efecto, el multimaterial se puede considerar un material isotrópico en el plano tangencial-longitudinal y en su plano espejo longitudinal-tangencial. Esto significa una mejora tecnológica si los requisitos de diseño demandan un material con características invariantes en función de la dirección de observación, es decir, un material isotrópico.

Para las tres especies, las velocidades medidas en la madera sólida, comparadas con las del multimaterial, los valores del sesgo y del apuntamiento estandarizado refieren distribuciones normales. Asimismo, la verificación de la varianza señala que no existen diferencias estadísticamente significativas, resultado que sugiere repetitividad en las magnitudes de las mediciones. En cambio, el análisis de varianza muestra que para cada uno de estos pares de muestras existen diferencias estadísticas, lo que se traduce en la diferenciación de sus grupos homogéneos. Estos resultados indican que la transformación de madera sólida en multimaterial modifica las velocidades del ultrasonido, lo que denota que el multimaterial posee propiedades acústicas diferenciadas de la madera con la que está fabricado. Esta modificación es útil para diseñar elementos funcionales donde las propiedades acústicas son específicas para una madera, pero diferentes para sus derivados.

3.2. Densidad

Las magnitudes de las densidades de las maderas sólidas (Tabla 1) son del mismo orden que las reportadas por [7] [8] para estas maderas. Dada la novedad del multimaterial, sus densidades no pueden ser comparadas con datos de la bibliografía. La densidad de la madera sólida es un predictor moderado de la densidad del multimaterial (Figura 3), posiblemente, porque durante su elaboración la distribución del adhesivo no fue uniforme. En la figura 3 y en las subsecuentes por motivos de escala no se observan todos los puntos experimentales. La densidad del multimaterial elaborado con *P. pseudostrobus* aumenta 9% respecto a la de la madera sólida; la de *T. rosea* aumenta 8% y la de *Q. scytophylla* se incrementa 8%. Dado que el peso de la malla es el mismo y se puede considerar similar en las probetas, estos incrementos se explican por la masa de la malla y del adhesivo presente en el multimaterial. En el mismo orden, los coeficientes de variación disminuyen 38%, 26% y 21%.

Esta disminución en la variabilidad natural de la densidad de la madera representa una mejora tecnológica y propone al multimaterial como una madera de ingeniería con aplicaciones para la industria de la construcción donde el diseño y cálculo ingenieril requieren materiales homogéneos y caracterizados a partir de resultados de laboratorio.

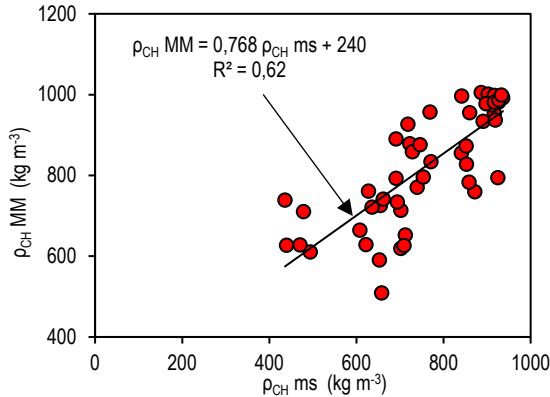


Figura 3. Correlación de la densidad del multimaterial (ρ_{CH} MM) en función de la densidad de la madera sólida (ρ_{CH} ms) de *P. pseudostrobus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla*.

3.3. Velocidad del ultrasonido

Las magnitudes de las velocidades del ultrasonido de las maderas sólidas (tabla 1) son del mismo orden que las reportadas para estas especies por [17]. Dada la novedad del multimaterial, sus velocidades del ultrasonido no pueden ser comparadas con datos de la bibliografía. Los resultados indican que las densidades no son buenos predictores de las velocidades del ultrasonido (figura 4). Sin embargo, se observan dos nubes de datos bien diferenciadas para la madera sólida y para el multimaterial de las tres especies. La velocidad del ultrasonido del multimaterial elaborado con *P. pseudostrobus* aumenta 33% respecto a la de la madera sólida; la de *T. rosea* aumenta 27% y la de *Q. scytophylla* se incrementa 36%. Es decir, la densidad y la velocidad del ultrasonido de la madera sólida se incrementan como efecto de su transformación en un multimaterial madera-malla-adhesivo.

Tabla 1. Resultados de densidad y pruebas de ultrasonido.

	ρ_{CH}	v_{US}	E_{US}
	($kg\ m^{-3}$)	($m\ s^{-1}$)	($MN\ m^{-2}$)
<i>Pinus pseudostrobus</i>			
Madera sólida			
μ	608	3232	6325
σ	101	368	1368
CV	(17)	(11)	(22)
Multimaterial			
μ	664	4402	12865
σ	68	189	1590
CV	(10)	(4)	(12)
<i>Tabebuia rosea</i>			
Madera sólida			
μ	775	3076	7358
σ	79	182	1180
CV	(10)	(6)	(16)

Multimaterial			
μ	835	3913	12817
σ	63	218	1738
CV	(8)	(6)	(13)
<i>Quercus scytophylla</i>			
Madera sólida			
μ	908	3188	9247
σ	26	161	974
CV	(3)	(5)	(11)
Multimaterial			
μ	980	4346	9247
σ	22	205	974
CV	(2)	(5)	(11)

ρ_{CH} = Densidad; v_{US} = Velocidad del ultrasonido; E_{US} = Módulo dinámico; μ = Media; σ = Desviación estándar; CV = Coeficiente de variación en porciento y entre paréntesis.

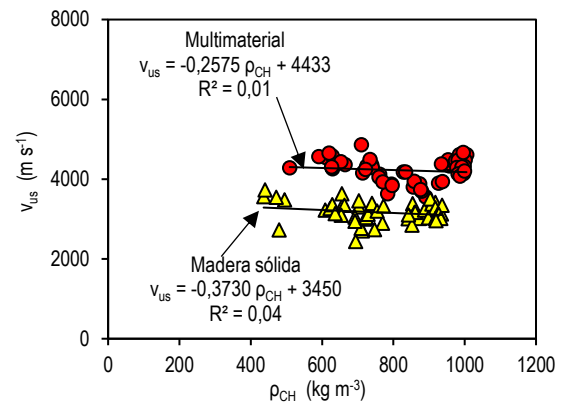


Figura 4. Correlaciones de las velocidades del ultrasonido (v_{US}) en función de las densidades (ρ_{CH}) de *P. pseudostrobus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla*.

En el mismo orden de ideas, los coeficientes de variación de las velocidades del multimaterial disminuyen 62%, 6% y 7% respecto a los de la madera sólida de las tres especies (Tabla 1). Estos resultados sugieren que la variabilidad natural de la madera disminuye como efecto de la elaboración del multimaterial, lo que se traduce en una mejora tecnológica.

Como consecuencia del acomodo ortogonal de las dos placas, la velocidad del ultrasonido medido, en las direcciones longitudinal y tangencial del multimaterial, se equilibra al rotar las probetas. En la figura 5 se presentan las mediciones de las placas 1 y 2 y de la malla situada entre ellas. En la misma figura se presentan los promedios de las mediciones del ultrasonido realizadas en las posiciones A y B en cada una de las placas 1 y 2 de *Q. scytophylla*. Las velocidades en la parte superior de las figuras corresponden a las direcciones longitudinales de las placas y de la malla. En su caso, las velocidades en la parte inferior se refieren a las direcciones tangenciales. Esos resultados fueron similares a los de *P. pseudostrobus* y *T. rosea*. Así, estos hallazgos sugieren que este efecto es independiente de la

especie y permite homogeneizar las magnitudes de las velocidades del ultrasonido en el multimaterial.

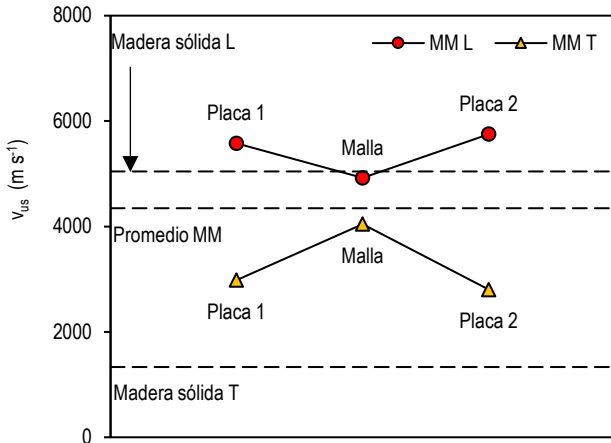


Figura 5. Velocidad del ultrasonido (v_{us}) en *Q. scytophylla*. MM = Multimaterial; T = Dirección tangencial; L = Dirección longitudinal.

Así, en la Figura 5, las mediciones de la parte superior son mayores pero próximas al promedio de las velocidades de la madera sólida en la dirección longitudinal y la velocidad del ultrasonido a través de la malla es menor, lo que hace que disminuyan los valores promedio (Tabla 1). A manera de un efecto de espejo, las velocidades en la parte inferior son mayores al promedio de las del ultrasonido de la dirección tangencial de la madera sólida (Figura 5). En este caso las mediciones en la malla son mayores que las de las placas.

Las diferencias entre especies y entre probetas son ocasionadas por la variabilidad natural de los caracteres anatómicos de la madera, como son el porcentaje de madera tardía presente en una capa de crecimiento anual, la desviación local de la fibra y el ángulo de los anillos de crecimiento de la sección transversal a la dirección del ultrasonido [18].

Las relaciones de anisotropía de la velocidad del ultrasonido entre las direcciones longitudinal y radial son para *P. pseudostrobus* 4,2; para *T. rosea* 3,2 y para *Q. scytophylla* 3,8; estos parámetros disminuyen respectivamente a 1,04, 1,05 y 1,07, lo que significa una disminución promedio de 72%. Este fenómeno se puede observar en la Figura 6 correspondiente a *T. rosea*. El valor promedio de la madera sólida en la dirección longitudinal es mayor que el correspondiente al multimaterial, el cual a la vez es mayor que el de la dirección radial. Esos resultados fueron similares a los de *P. pseudostrobus* y *Q. scytophylla*. Así, el multimaterial equilibra las diferencias entre las velocidades longitudinal y tangencial de la madera sólida y se prospecta como un material menos variable y más homogéneo en lo que respecta a su capacidad para transmitir una onda mecánica, en este caso, de ultrasonido.

Como resultado, las velocidades promedio del multimaterial son mayores que las de la dirección tangencial de la madera sólida pero menores a las correspondientes a la dirección longitudinal [19].

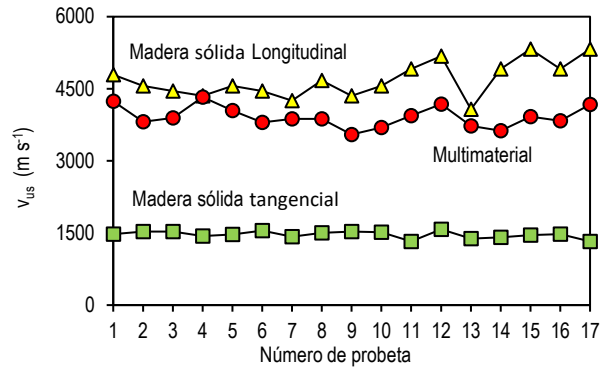


Figura 6. Velocidad del ultrasonido (v_{us}) para *T. rosea*.

Dado que las relaciones de anisotropía indican la preponderancia de la velocidad en la dirección longitudinal, respecto a la tangencial, este análisis explica el aumento aparente de la velocidad del ultrasonido en el multimaterial respecto a la madera sólida. Estos resultados indican una ganancia tecnológica ya que el multimaterial equilibra la transmisión del ultrasonido, reduce la anisotropía propia de la madera sólida y aumenta la capacidad de transmisión del ultrasonido en las direcciones ortogonales que forman el plano longitudinal-tangencial. Este fenómeno ha sido reportado por [9] para multimaterial de *P. pseudostrobus* y sus efectos en el módulo dinámico.

3.4. Módulo dinámico

Las magnitudes de módulos dinámicos de las maderas sólidas (Tabla 1) son del mismo orden que las reportadas por [20] para estas maderas. Dada la novedad del multimaterial, sus módulos dinámicos no pueden ser comparados con datos de la bibliografía. Las densidades son predictores moderados de los módulos dinámicos (Figura 7). Sin embargo, sus coeficientes de determinación R^2 son similares. Este análisis integra el incremento en las magnitudes de la densidad y la velocidad del ultrasonido (Ecuación 2), así como la disminución de la variabilidad representada por los coeficientes de variación.

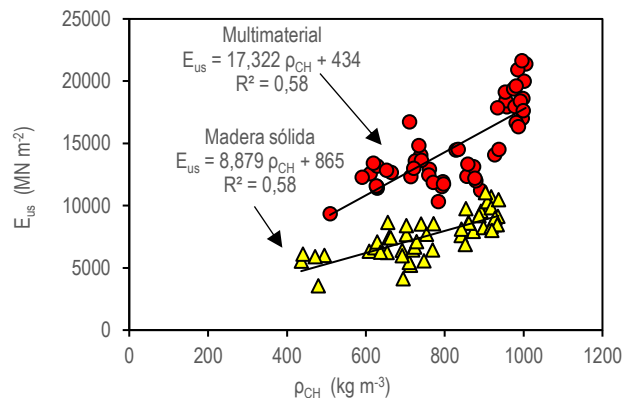


Figura 7. Correlaciones de los módulos dinámicos (E_{us}) en función de las densidades (ρ_{CH}) de *P. pseudostrobus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla*.

El módulo dinámico del multimaterial elaborado con *P. pseudostrabus* aumenta 103% respecto al de la madera sólida; el de *T. rosea* aumenta 74% y el de *Q. scytophylla* se incrementa 101%. En el mismo orden, los coeficientes de variación disminuyen 43%, 15% y 4%. De tal manera que el multimaterial mejora la resistencia de la madera con la cual está elaborado y al mismo tiempo disminuye su variabilidad. Así, estos parámetros representan los valores promedio de las mediciones realizadas y, con los ajustes requeridos por la normatividad, pueden ser utilizados, para fines prácticos, por el ingeniero y arquitecto que requieren valores para cálculo y diseño de edificación y reparación de estructuras de madera [21].

Conclusiones

En la presente investigación se estudiaron 51 probetas de madera sólida y 51 de multimaterial madera-malla-adhesivo elaboradas con maderas de *P. pseudostrabus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla*. Se determinaron sus densidades, velocidades del ultrasonido y módulos dinámicos. Se analizaron los resultados probetas por probeta de una misma especie, su anisotropía y se calcularon las correlaciones estadísticas entre los parámetros estudiados.

Como efecto de la elaboración del multimaterial, la densidad, la velocidad del ultrasonido y el módulo dinámico de la madera sólida aumentan; en cambio, su variabilidad y anisotropía disminuyen. La malla y el adhesivo funcionan como componentes estabilizadores, por esto en el multimaterial disminuye la magnitud de la velocidad longitudinal, pero aumenta la tangencial.

La densidad no es un buen predictor de la velocidad del ultrasonido. En cambio, es un predictor moderado del módulo dinámico.

El uso de un material que combina madera, malla y adhesivo se considera como una alternativa a la madera sólida en proyectos de construcción y arquitectura. Hay muchas oportunidades para investigar cómo se comportan los materiales laminados y multimateriales que se asemejan a la madera sin perder sus características estéticas, ecológicas y sostenibles.

Agradecimientos:

La investigación estuvo patrocinada por la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México.

Referencias

- [1] D. Sandberg, A. Kutnar, & G. Mantanis, "Wood modification technologies - a review". *iForest*, vol. 10, pp. 895-908. 2017. <http://dx.doi.org/10.3832/ifer2380-010>
- [2] M. H. Ramage, H. Burridge, M. Busse-Wicher, G. Fereday, T. Reynolds, D. U. Shah, G. Wu, Y. Yu, P. Fleming, D. Densley-Tingley, J. Allwood, P. Dupree, P. F. Linden, & O. Scherman, "The wood from the trees: The use of timber in construction". *Renewable and Sustainable Energy Review*, vol. 68, pp. 333-359. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.107>
- [3] G. A. Ormondroyd, M. Spear, & S. F. Curling, "Modified wood: Review of efficacy and service life testing". *Constructions Materials, Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Paper 1400072*. 2015. <http://dx.doi.org/10.1680/coma.14.00072>
- [4] F. Asdrubali, B. Ferracuti, L. Lombardi, C. Guattari, L. Evangelisti, & G. Grazieschi, "A review of structural, thermo-physical, acoustical, and environmental properties of wooden materials for building applications". *Building and Environment*, vol. 114, pp. 307-332. 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.12.033>
- [5] T. Żmijewski, & D. Wojtowicz-Jankowska, "Timber - Material of the Future - Examples of Small Wooden Architectural Structures". *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, vol. 245, 082019. 2017. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/245/8/082019>
- [6] D. Kohl, T. H. N. Long, & S. Böhm, "Wood-Based Multi-Material Systems for Technical Applications – Compatibility of Wood from Emerging and Developing Countries". *Procedia Manufacturing*, vol. 8, pp. 611-618. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.02.07>
- [7] J. C. Tamarit Urias, & J. L. López Torres, "Xilotecnología de los principales árboles tropicales de México". Puebla, México. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. 2020.
- [8] J. A. Silva Guzmán, F. J. Fuentes Talavera, R. Rodríguez Anda, P. A. Torres Andrade, M. A. Lomelí Ramírez, J. Ramos Quirarte, C. Waitkus, & H. G. Richter, "Fichas de propiedades tecnológicas y usos de maderas nativas de México e importadas". Guadalajara, México. Comisión Nacional Forestal. 2010.
- [9] I. Macedo Alquicira, J. R. Sotomayor Castellanos, & F. J. Castro Sánchez, "Laminated wood and multimaterial wood – adhesive meshes replacements of solid wood in restoration of historical buildings". *Int. Arch. Photogram. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* vol. XLII XLII 2/W15, pp. 711-718. 2019. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-711-2019>
- [10] I. Macedo Alquicira, & J. R. Sotomayor Castellanos, "Velocidades del ultrasonido y módulos dinámicos de madera sólida, laminada y multimaterial de *Pinus pseudostrabus* Lindl.". XXVII Congreso Internacional Anual de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica. Pachuca, México. Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica. 2021. https://somim.org.mx/memorias/memorias2021/articulos/A2_9.pdf
- [11] International Organization for Standardization. ISO 13061-1:2014, "Physical and mechanical properties of wood - Test methods for small clear wood specimens - Part 1: Determination of moisture content for physical and mechanical tests". Geneva, Switzerland. International Organization for Standardization. 2014.
- [12] International Organization for Standardization. ISO 13061-2:2014, "Physical and mechanical properties of wood - Test methods for small clear wood specimens - Part 2: Determination of density for physical and mechanical tests". Geneva, Switzerland. International Organization for Standardization. 2014.
- [13] J. R. Sotomayor Castellanos, K. Adachi, R. Iida, & T. Hayashi, "Verificación con ultrasonido del tratamiento de densificado en ocho maderas mexicanas". *Ingeniería Mecánica*. vol. 24, e620. 2021. <https://ingenieriamecanica.cujae.edu.cu/index.php/revistaim/article/view/648/1149>
- [14] M. A. Meyers, "Dynamic Behavior of Materials". Hoboken, USA. John Wiley & Sons. 1994.
- [15] U. Dackermann, R. Li, J. Elsener, & K. Crews, "A comparative study of using static and ultrasonic material testing methods to determine the anisotropic material properties of wood". *Construction and Building Materials*, vol. 102, pp. 963-976. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.195>
- [16] H. Gutiérrez Pulido, & R. De la Vara Salazar, "Análisis y diseño de experimentos". México, México. McGrawHill. 2012.
- [17] J. R. Sotomayor Castellanos, I. Macedo Alquicira, & H. L. Chávez García, "Variabilidad en las densidades, las velocidades del ultrasonido y los módulos dinámicos en tres maderas mexicanas y tres maderas japonesas". *Ingeniería y Desarrollo*, vol. 38, pp. 282-299. 2020. https://www.researchgate.net/publication/346543381_Variabilidad_en_las_densidades_las_velocidades_del_ultrasonido_y_los_modulos_dinamicos_en_tres_maderas_mexicanas_y_tres_maderas_japonesas
- [18] G. Manzo, J. Tippner, & P. Zatloukal, "Relationships between the Macrostructure Features and Acoustic Parameters of Resonance Spruce for Piano Sound". *Applied Sciences*, vol. 11, pp. 1749-1753. 2021. <https://doi.org/10.3390/app1104>
- [19] E. Baradit, C. Fuentealba, & M. Yáñez, "Elastic constants of Chilean *Pinus radiata* using ultrasound". *Maderas. Ciencia y tecnología*, vol. 23, pp. 1-10. 2021. <http://dx.doi.org/10.4067/s0718-221x2021000100427>
- [20] J. R. Sotomayor Castellanos, "Módulos de elasticidad e índices de calidad de maderas mexicanas. Síntesis de datos del Laboratorio de Mecánica de la Madera". *Investigación e Ingeniería de la Madera*, vol. 15, pp. 4-64. 2019.

https://www.researchgate.net/publication/335665376_Modulos_de_elasticidad_e_indices_de_calidad_de_maderas_mexicanas_Sintesis_de_datos_del_Laboratorio_de_Mecanica_de_la_Madera

- [21] J. Jaskowska-Lemańska, & E. Przesmycka, "Semi-Destructive and Non-Destructive Tests of Timber Structure of Various Moisture Contents". *Materials*, vol. 14, pp. 96-118. 2021. <https://doi.org/10.3390/ma14010096>