



Módulo de rigidez del multimaterial madera-malla-adhesivo de *Pinus pseudostrubus*, *Tabebuia rosea* y *Quercus scytophylla*

Sonia Correa Jurado¹, Javier Ramón Sotomayor Castellanos^{1*}, Israel Macedo Alquicira¹

1. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Avenida Francisco J. Múgica S/N. Ciudad Universitaria, CP 58030. Morelia, Michoacán, México.

*E-mail: javier.sotomayor@umich.mx

PALABRAS CLAVES

Construcción
Materiales
Densidad
Vibraciones

RESUMEN

En la industria de la construcción con madera, se requieren materiales estandarizados que posean características mecánicas claramente definidas. Mediante la combinación de placas de madera sólida con mallas, tejidos y adhesivos apropiados, la madera se convierte en un multimaterial. El módulo de rigidez de la madera y del multimaterial son útiles para calcular elementos y conexiones donde aparecen deformaciones fuera de plano causadas por esfuerzos cortantes. El objetivo de la investigación fue cuantificar la densidad y el módulo dinámico en muestras estadísticamente representativas de *P. pseudostrubus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla*, y contrastar dichos parámetros con los obtenidos en probetas del multimaterial confeccionado con dichas especies. Se prepararon tres grupos de probetas de madera sólida de pequeñas dimensiones, así como tres grupos de multimaterial de madera con adhesivo y malla. Se llevaron a cabo pruebas de vibraciones en torsión, se registraron las frecuencias de vibración y se calcularon los módulos de rigidez correspondientes. Para las tres especies, se observa un incremento en la densidad y el módulo de rigidez del multimaterial en comparación con la madera en estado sólido. En comparación con la madera sólida, la variabilidad del módulo de rigidez se reduce en el caso del multimaterial.

Rigidity modulus of the wood-mesh-adhesive multimaterial of *Pinus pseudostrubus*, *Tabebuia rosea* and *Quercus scytophylla*

KEYWORDS

Construction
Materials
Density
Vibrations

ABSTRACT

In the wood construction industry, standardized materials with clearly defined mechanical properties are required. By combining solid wooden plates with appropriate meshes, fabrics, and adhesives, wood is transformed into a multimaterial. The modulus of rigidity of wood and multimaterial is useful for calculating elements and connections where out-of-plane deformations occur due to shear stresses. The objective of the research was to quantify the density and dynamic modulus in statistically representative samples of *P. pseudostrubus*, *T. rosea* and *Q. scytophylla*, and to compare these parameters with those obtained from specimens made of the multimaterial created with these species. Three groups of small solid wood test specimens were prepared, as well as three groups of wooden multimaterial with adhesive and mesh. Torsional vibration tests were conducted, the vibration frequencies were recorded, and the corresponding modulus of rigidity were calculated. For the three species, an increase in density and the modulus of rigidity of the multimaterial is observed compared to solid wood. Compared to solid wood, the variability of the modulus of rigidity is reduced in the case of multimaterial.

1. Introducción

La industria de la construcción con madera demanda materiales normalizados y con características mecánicas bien definidas. La tendencia tecnológica es desarrollar productos compuestos y derivados de madera para reemplazar elementos de madera que

requieren sobredimensionado por su heterogeneidad estructural y variabilidad natural. La madera se transforma en un multimaterial al combinarla con mallas, tejidos y adhesivos adecuados, lo que proporciona una mejora tecnológica para aplicaciones especializadas (Kohl et al., 2017). Para avanzar desde la valoración de la madera como una materia prima de origen forestal

hasta su clasificación como un material de ingeniería, se ha desarrollado la tecnología para reforzar componentes de madera sólida y/o laminada con metales (Jasieńko y Nowak 2014; Cañola et al., 2018), cementos (Jorge et al., 2004; Na et al., 2014), fibras naturales (Saba et al., 2016) y/o sintéticas (Qi et al., 2015; Nadir et al., 2016; Kusnindar et al., 2018), y consolidarlos mediante resinas y/o adhesivos (Gáborik et al., 2016; Stoeckel et al., 2013) y/o componentes mecánicos (Campilho et al., 2010; Dietsch y Brandner 2015; Steiger et al., 2015; Qiao et al., 2020).

Así, mediante la combinación de las características físico-mecánicas de cada componente, se alcanza un incremento en su resistencia mecánica y, al integrar compuestos protectores, se disminuye su biodeterioro y se optimiza su estabilización dimensional. Como resultante, se presentan amplias oportunidades para el diseño mecánico de compuestos, laminados y multimateriales que exhiben características análogas a las de la madera sin comprometer sus atributos estéticos, ambientales y de sostenibilidad (Milner 2009; Asdrubali et al., 2017; Caruso et al., 2017).

Un multimaterial de madera puede ser caracterizado como un compuesto que incorpora la sustancia madera como base o sustrato en su estructura y se amalgama con otros componentes de diversa naturaleza, como plástico, metal o fibras naturales. Como complemento, incorpora uno o más elementos que actúan como adhesivos y conectores entre las partes.

Inicialmente, se contempla en forma de placas y/o tableros. En lo concerniente a la escala, se prospecta en espesores análogos a los tableros de madera. Sin embargo, se puede proyectar en cualquier dimensión o geometría, como, por ejemplo, vigas y columnas de madera laminada. En términos conceptuales, el multimaterial se refiere a una membrana que se caracteriza por ser una malla de acero galvanizada, que está rodeada y/o protegida por dos elementos aislantes y/o protectores de un biomaterial, los cuales están unidos mediante un adhesivo.

Esta membrana puede ser sustituida por uno o varios componentes metálicos, plásticos, biológicos y de fibras naturales y/o sintéticas, capaces de almacenar, disipar y/o transmitir información codificada. Estos pueden incluir, por ejemplo, un

material aislante de sonido y/o temperatura, un material sensible al movimiento, y circuitos electrónicos. El adhesivo puede ser reemplazado por pegamentos naturales y/o polímeros sintéticos adecuados para el propósito del diseño del multimaterial (Macedo y Sotomayor 2021).

El módulo de rigidez de la madera es útil para el cálculo ingenieril de elementos y conexiones en los que se observan deformaciones fuera de plano, provocadas por esfuerzos de corte (Cavalli et al., 2017). Se han publicado datos relativos al módulo de rigidez de la madera para una diversidad considerable de especies (Sotomayor 2018; Macedo et al., 2022; Sotomayor 2024).

No obstante, hasta la fecha, no se ha identificado datos relativos a la caracterización en torsión del multimaterial madera-malla-adhesivo utilizando maderas de *Pinus pseudostrabus* Lindl. var *pseudostrobis*, *Tabebuia rosea* (Bertol.) Bertero ex A.DC. y *Quercus scytophylla* Liebm. Las tres especies citadas son endémicas de México y Centroamérica, y su aplicación es extensa en la industria de la construcción y la producción de productos madereros. Sus características físicas y tecnológicas mecánicas están divulgadas por Tamarit y López (2007) y Silva et al. (2010).

En el transcurso del proceso de construcción, la estructura construida con madera incorpora madera, tableros aglomerados de fibra, partículas y astillas, además de madera laminada (Jacob et al., 2018). En el presente escenario, el multimaterial madera-malla-adhesivo es considerado un material de ingeniería que tiene la capacidad de reemplazar componentes de madera que funcionan como componentes estructurales y/o arquitecturales.

La madera de *P. pseudostrabus* se caracteriza por su albura de brillo mediano, color amarillo pálido, grano recto, veteado suave a pronunciado. Posee excelente trabajabilidad. Sus usos actuales son aserrío, chapas para contrachapado, pulpa, molduras y en la industria de la construcción, así como en marcos de puertas y ventanas, tarimas, muebles modulares. Esta especie es muy apreciada para la elaboración de artesanías. Sus usos potenciales son elementos no estructurales en interiores, molduras, así como para fabricar muebles de alta calidad, pisos, cancelas, tarimas, plataformas, armaduras, muros, vigas, postes, pasarelas, estructuras. Si es tratada con asoles, puede ser usada

en aplicaciones en contacto con el suelo, además si se impregna con sales de boro puede ser utilizada para muebles, puertas, pasamanos y en lugares protegidos del intemperismo; se recomienda para plantaciones comerciales (Rendón et al., 2021).

La madera de *T. rosea* posee su albura de color café rosado. Su duramen es de brillo medio, algo lustroso, de color blanco rosáceo. Su durabilidad natural va de moderada a resistente. De grano entrecruzado, oblicuo y/o ondulado. Su textura va de media a gruesa, con veteado pronunciado. Sus usos actuales son en la fabricación de chapa, lambrín, triplay, pisos, muebles, instrumentos musicales, construcciones y decoración de interiores. Se considera excelente para acabados, ebanistería y construcción en general. Sus usos potenciales pueden ser para madera terciada, elementos no estructurales como marcos de puertas, ventanas y pasamanos (Rendón et al., 2021).

La madera de *Q. cytophylla* es de albura gris rosado o blanco rosado, con rayos rojo oscuro y con duramen color castaño ligeramente rojizo. De grano recto, textura gruesa y veteado pronunciado. Esta madera tiene excelentes características de maquinado, torneado, taladrado, moldurado y lijado, para procesar la madera es recomendable utilizar una sierra banda con las características adecuadas para aserrar madera dura. Sus usos actuales son para aserrío y es apropiada para la industria maderera en la elaboración de molduras, lambrín y muebles. De acuerdo con las características anatómicas tiene menos problemas para el aserrío y el secado. Como usos potenciales se recomienda que se utilice en la elaboración de productos de alta calidad tales como ebanistería, chapa, pisos, lambrín, cancelas, accesorios y decoración en general y partes de instrumentos musicales (Rendón et al., 2021).

La hipótesis planteada en la investigación postula que la conversión de madera sólida en un multimaterial madera-malla-adhesivo incrementa su módulo dinámico y reduce la variabilidad natural inherente a esta característica. Con el propósito de corroborar esta hipótesis, el objetivo de la investigación fue cuantificar la densidad y el módulo

dinámico en muestras estadísticamente representativas de *P. pseudostrubus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla*, y contrastar dichos parámetros con los obtenidos en probetas del multimaterial confeccionado con dichas especies.

2. Materiales y métodos

Se prepararon seis grupos de probetas, cada uno con 17 unidades. Tres de ellos tienen dimensiones de 0,02 m × 0,15 m × 0,15 m en las direcciones radial, tangencial y longitudinal, y son de madera sólida de *P. pseudostrubus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla*. Los otros tres grupos están compuestos por probetas de multimaterial madera-malla-adhesivo. Estas probetas están hechas de dos placas de madera de la misma especie con dimensiones de 0,01 m × 0,15 m × 0,15 m (Figura 1). Estas dos placas están unidas de forma ortogonal en las direcciones tangencial y longitudinal a través de una mezcla de dos componentes de adhesivo de poliuretano distribuidos en 200 kg m⁻². El adhesivo contiene componentes orgánicos volátiles de 5,6 g l⁻¹, viscosidad de 4200 mN m⁻² s, pH de 2,5, duración de la unión abierta de 10 min y resistencia a la unión de 191,5 kN m⁻² (ASTM D-905, American Society for Testing and Materials, 2021). Para fortalecer la conexión entre las dos láminas de madera, se insertó una malla de acero galvanizado de 0,92 mm de espesor entre ambas placas.

Los tres materiales fueron sometidos a una consolidación con una presión de 250 kg m⁻² y una temperatura de 90 °C durante un lapso de 1 hr. De esta manera, se obtuvieron seis muestras independientes y uniformes: tres de madera y tres 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. Las probetas se almacenaron en una cámara de acondicionamiento con temperatura de 20 °C y humedad relativa del aire de 65% hasta que alcanzaron un contenido de humedad en equilibrio de la madera de 10% y el del multimaterial de 11%. La determinación del contenido de humedad en las probetas se llevó a cabo conforme a la norma ISO 13061-1 (2014).

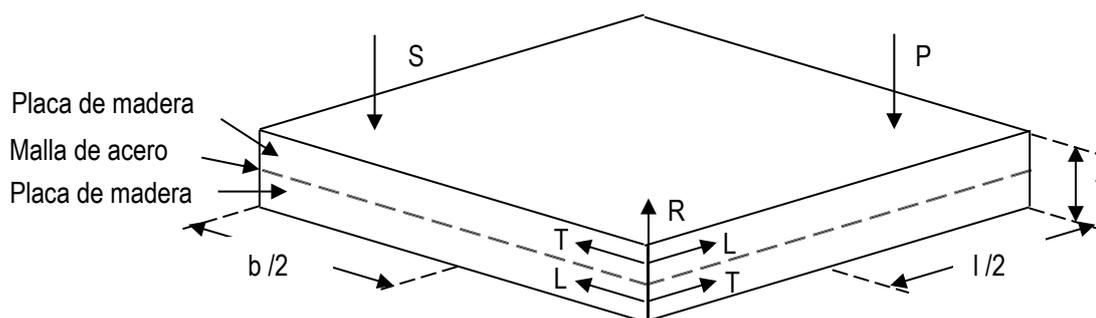


Figura 1. Diagrama de las pruebas de vibraciones en torsión. P: posición para aplicar el impacto; S: posición para medir la frecuencia natural; R: dirección radial (t: espesor); T: dirección tangencial (l: largo); L: dirección longitudinal (b: ancho).

Por otro lado, se calculó la densidad de la madera conforme a la norma ISO 13061-2 (2014). Las pruebas de vibración en torsión adaptaron el protocolo de la norma ASTM C1259-15 (American Society for Testing and Materials, 2015a). El módulo de rigidez de la madera por vibraciones en torsión se calculó de acuerdo con la norma ASTM E1876-15 (American Society for Testing and Materials, 2015b) utilizando la fórmula (1):

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

Donde G_{LT} = Módulo de rigidez ($N m^{-2}$), f = Frecuencia natural (Hz), m = masa de la probeta (g), l = Largo de la probeta (Dirección tangencial) (m), t = Espesor de la probeta (Dirección radial) (m), b = Ancho de la probeta (Dirección longitudinal) (m) y A, B = Factores de ajuste geométrico.

Diseño experimental

La unidad experimental consistió en tres grupos de madera sólida y tres de multimaterial de *P. pseudostrubus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla*. Diecisiete probetas fueron asignadas a cada grupo. Los valores de densidad (ρ_{CH}) y módulo de rigidez (G_{LT}) calculados se utilizaron como variables de entrada para representar el estado de madera sólida en las tres especies. Las variables de salida fueron los parámetros calculados para un estado multimaterial formado con la misma especie que la madera sólida. Se consideró el contenido de humedad (CH) como variable de referencia y no intervino en el experimento.

Se llevaron a cabo pruebas para verificar la distribución normal de las muestras (Kolmogorov-

Smirnov). Para considerar una distribución como normal, se estableció como criterio de demarcación que los valores de sesgo estandarizado (SE) y apuntamiento estandarizado (AE) debían encontrarse dentro del rango de -2 a $+2$. Se llevaron a cabo pruebas de hipótesis para verificar la igualdad de varianzas (Ver-var, prueba de Levene) y para realizar un análisis de varianza (Anova) con un nivel de confianza del 95 por ciento. El criterio de demarcación para aceptar una diferencia de relevancia estadística fue aceptar valores de $P_{(\alpha=0.05)} < 0.05$.

Se llevaron a cabo evaluaciones de rangos múltiples (Diferencia Mínima Significativa de Fisher) con el criterio de demarcación de no aceptar diferencias significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X. Los resultados se contrastaron con datos recopilados en la bibliografía (Tabla 1).

3. Resultados y Discusión

Las evaluaciones de normalidad señalan que todas las muestras presentan homogeneidad y distribuciones de distribución uniforme [$-2 < SE, AE < +2$] (Tabla 2). Las evaluaciones de varianza confirman que las muestras son homogéneas y comparables, dado que $P_{(\alpha = 0,05)} > 0,05$. El análisis de varianza aplicado a la densidad de *P. pseudostrubus* evidencia una diferencia notable ($P_{(\alpha = 0,05)} < 0,05$). Por otro lado, en relación con su módulo de rigidez, no se detecta una variación significativa. Este mismo resultado se repite para la densidad y la resistencia de la madera de *T. rosea*. En cambio, con el *Q. scytophylla* es distinto, ya que su densidad y su resistencia son diferentes.

Tabla 1. Densidades y módulo de rigidez de la bibliografía. ρ_{CH} = Densidad; G_{LT} = Módulo de rigidez

Especies	ρ_{CH} (kg m ⁻³)	G_{LT} (MN m ⁻²)	Referencias
<i>Paulownia tomentosa</i>	266	456	Sotomayor (2024)
<i>Picea sitchensis</i>	390	720	Wang et al. (2018)
<i>Pinus sylvestris</i>	398	755	Roohnia y Kohantorabi (2015)
<i>Cryptomeria japonica</i>	421	742	Sotomayor (2024)
<i>Picea abies</i>	465	863	Kránitz et al. (2014)
<i>Picea abies</i>	472	744	Olsson y Källsner (2013)
<i>Tabebuia donnell-smithii</i>	496	870	Sotomayor (2016)
<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	506	695	Sotomayor (2016)
<i>Pinus densiflora</i>	510	981	Cha (2015)
<i>Tabebuia rosea</i>	592	879	Sotomayor (2024)
<i>Hevea brasiliensis</i>	605	1008	Nadir et al. (2014)
<i>Pinus pseudostrubus</i>	620	1141	Sotomayor (2024)
<i>Fagus crenata</i>	629	1056	Sotomayor (2024)
<i>Swietenia humilis</i>	662	1019	Sotomayor (2016)
<i>Fagus sylvatica</i>	689	1010	Ozyhar et al. (2013)
<i>Lysiloma acapulcensi</i>	716	1328	Sotomayor (2016)
<i>Tabebuia rosea</i>	776	1563	Sotomayor (2024)
<i>Quercus scytophylla</i>	976	1204	Sotomayor (2024)
<i>Cordia elaeagnoides</i>	1135	2157	Sotomayor (2024)
<i>Tabebuia chrysantha</i>	1274	2807	Sotomayor (2024)

Las densidades de madera sólida y multimaterial correspondientes a las tres especies estudiadas no comparten una misma columna de X. Igualmente, el módulo de rigidez del multimaterial compuesto por *Q. scytophylla* no comparte una columna de X idéntica. En otras palabras, se observan discrepancias estadísticamente notables entre estos niveles. Por el contrario, los módulos de rigidez de *P. pseudostrubus* y *T. rosea* exhiben homogeneidad debido a que comparten una misma columna de X.

La elaboración de probetas en forma de placas, tal como se ilustra en la Figura 2, facilitó la realización de pruebas de vibraciones de torsión (Sotomayor, 2016; Sotomayor, 2024). Esta tecnología puede aplicarse a elementos estructurales con geometrías de tableros, columnas y/o vigas con utilidad en la industria de la edificación, así como en la fabricación de muebles, si se determinan sus características tecnológicas en probetas con dimensiones de empleo.

Tabla 2. Resultados del análisis estadístico.

Material	Parámetro	SE [-2, +2]	AE [-2, +2]	Ver-var P($\alpha=0.05$)	Anova P($\alpha=0.05$)	GH #
<i>Pinus pseudostrubus</i>						
Madera sólida	ρ_{CH}	-0,761	0,074	0,880	0,022*	X
Multimaterial	ρ_{CH}	-0,708	-0,119			X
Madera sólida	G_{LT}	0,995	0,724	0,756	0,532	X
Multimaterial	G_{LT}	-0,257	-0,968			X
<i>Tabebuia rosea</i>						
Madera sólida	ρ_{CH}	0,195	-0,165	0,695	0,006*	X
Multimaterial	ρ_{CH}	0,222	-0,378			X
Madera sólida	G_{LT}	1,336	-0,199	0,678	0,664	X
Multimaterial	G_{LT}	0,497	-0,820			X
<i>Quercus cytophylla</i>						
Madera sólida	ρ_{CH}	-1,720	0,183	0,666	< 0,001*	X
Multimaterial	ρ_{CH}	-1,678	-0,049			X
Madera sólida	G_{LT}	0,945	1,305	0,838	0,020*	X
Multimaterial	G_{LT}	-0,789	1,290			X

ρ_{CH} = Densidad; G_{LT} = Módulo de rigidez; SE = Sesgo estandarizado; AE = Apuntamiento estandarizado; Ver-var = Verificación de varianza; Anova = Análisis de varianza; * Existe una diferencia significativa para $P_{(\alpha=0.05)} < 0.05$; GH = Grupos homogéneos; # = No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que comparten una misma columna de X.

Densidad

En comparación con la densidad de la madera sólida, la del multimaterial experimenta un incremento del 9% para *P. pseudostrubus*, del 8% para *T. rosea* y del 7% para *Q. scytophylla*. La variabilidad de esta característica, que se explica mediante el coeficiente de variación, disminuye en un 9% para *P. pseudostrubus* y en un 14% para *T. rosea*, pero se mantiene similar para *Q. scytophylla* (Tabla 3).

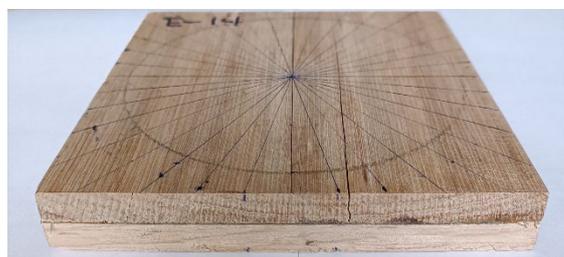


Figura 2. Probeta de multimaterial de *Q. cytophylla*.

Conforme la densidad se eleva, el módulo de rigidez experimenta un incremento. Se observa un aumento en las densidades y módulos de rigidez del

multimaterial en comparación con la madera sólida, tal como se ilustra en las Figuras 3 y 4.

Las variaciones en las magnitudes del módulo de rigidez documentadas en la literatura pueden ser atribuidas tanto a la especie (Rocco et al., 2017) como al método de cálculo (Krüger y Wagenführ,

2020). La estructura anatómica de las tres maderas examinadas presenta variaciones (Tamarit y López 2007), y los ensayos dinámicos se llevaron a cabo bajo las mismas condiciones. Por lo tanto, la fluctuación de la resistencia elástica en torsión es principalmente atribuible a la especie.

Tabla 3. Densidades y módulos de rigidez.

Especies	ρ_{CH} (kg m ⁻³)			G_{LT} (MN m ⁻²)		
	μ	σ	CV	μ	σ	CV
Madera sólida						
<i>Pinus pseudostrubus</i>	608	67	(11)	1075	177	(16)
<i>Tabebuia rosea</i>	774	58	(7)	1560	238	(15)
<i>Quercus scytophylla</i>	913	20	(2)	1289	74	(6)
Multimaterial						
<i>Pinus pseudostrubus</i>	664	68	(10)	1131	170	(15)
<i>Tabebuia rosea</i>	835	63	(8)	1593	206	(13)
<i>Quercus scytophylla</i>	980	22	(2)	1347	66	(5)

ρ_{CH} = Densidad; G_{TL} = Módulo de rigidez; μ = Media; σ = Desviación estándar; CV = Coeficiente de variación en por ciento y entre paréntesis; Contenido de humedad CH = 11%.

Módulo de rigidez

El análisis de varianza indica que las diferencias significativas entre los valores del módulo de rigidez (madera versus multimaterial) no se manifiestan entre las maderas de *P. pseudostrubus* y *T. rosea*. Por lo tanto, estas especies se distinguen de la de *Q. scytophylla*, en la que sí se observa una diferencia significativa. No obstante, desde un punto de vista aritmético, el módulo de rigidez del multimaterial experimenta un incremento promedio del 4% en comparación con el de la madera sólida (Tabla 3).

Las características del módulo de rigidez en la madera de *P. pseudostrubus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla* presentan similitudes con las observadas en especies mexicanas con densidades análogas

(Sotomayor, 2018). En comparación con el módulo de rigidez de la madera sólida, se observa un incremento del 5% en el caso de *P. pseudostrubus*, un 2% en el de *T. rosea* y un 4% en el de *Q. scytophylla*. La variabilidad de este parámetro, evidenciada por el coeficiente de variación, disminuye en un 6% para *P. pseudostrubus*, un 13% para *T. rosea* y un 16% para *Q. scytophylla* (Tabla 3).

Desde el enfoque del análisis de resultados de cada especie, la densidad de la madera sólida de *P. pseudostrubus* constituye un buen indicador de su módulo de rigidez ($R^2 = 0,76$). Por el contrario, las maderas de *T. rosea* y *Q. scytophylla* exhiben correlaciones débiles (Figura 3). Se pueden observar las mismas tendencias para el multimaterial en la Figura 4.

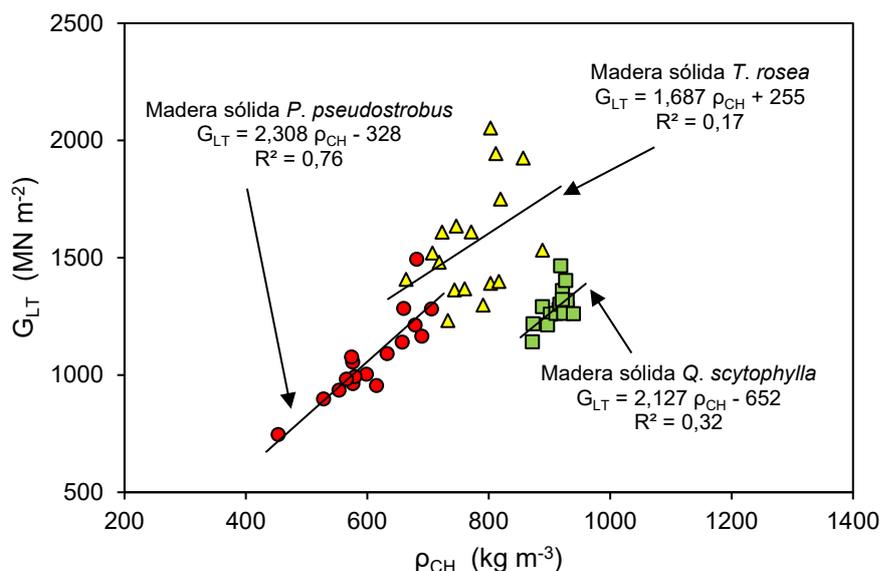


Figura 3: Correlaciones de los módulos de rigidez (G_{LT}) de la madera sólida en función de sus densidades (ρ_{CH}).

El rango de densidades mencionadas en la Tabla 1 abarca desde los 266 kg mm^{-3} de *Paulownia tomentosa* (Sotomayor, 2024) hasta los 1274 kg m^{-3} de *Tabebuia chrysantha* (Sotomayor, 2016). De manera similar, el intervalo correspondiente a los módulos de rigidez se extiende desde 456 MN m^{-2} de *Paulownia tomentosa* (Sotomayor, 2024) hasta 2807 MN m^{-2} de *Tabebuia chrysantha* (Sotomayor, 2016).

En la presente investigación, el rango de las densidades de la madera sólida (Tabla 3) va desde 608 kg m^{-3} de la madera de *P. pseudostrubus* hasta 980 kg m^{-3} del multimaterial de *Q. scytophylla*. Igualmente, el intervalo correspondiente a los módulos de rigidez va desde 1075 MN m^{-2} para *P. pseudostrubus* hasta 1593 MN m^{-2} de *Q. scytophylla*.

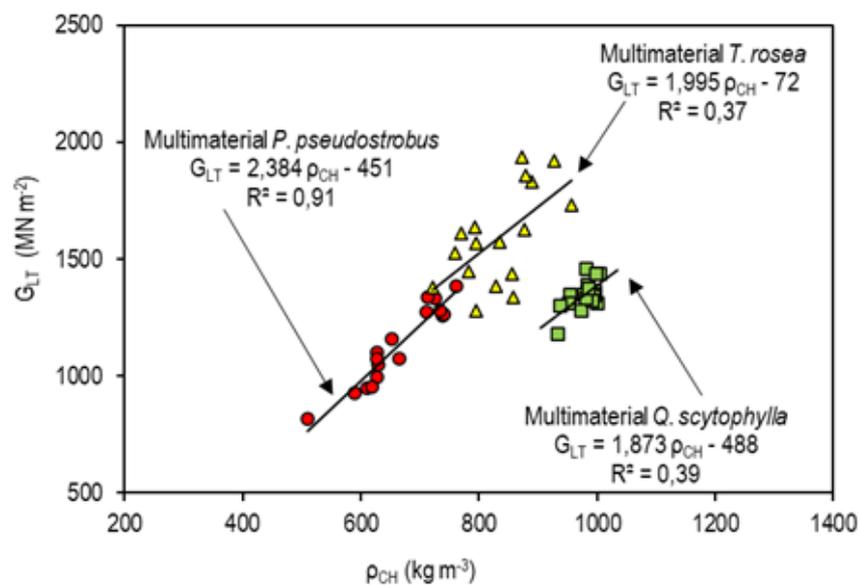


Figura 4. Correlaciones de los módulos de rigidez (G_{LT}) del multimaterial en función de sus densidades (ρ_{CH}).

Estos hallazgos se ilustran en la Figura 5, donde se evidencia que las densidades y los módulos de rigidez están en línea con la tendencia de los datos

bibliográficos, los cuales presentan una correlación elevada ($R^2 = 0,87$), lo que indica que los módulos de rigidez tanto de la madera como del multimaterial

tienden a aumentar de manera proporcional al incremento de sus respectivas densidades.

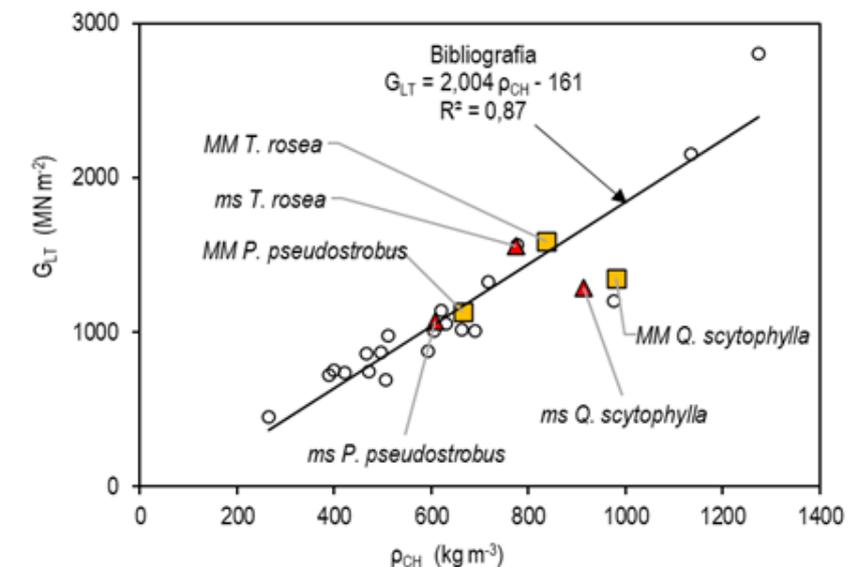


Figura 5: Posicionamiento de los módulos de rigidez (G_{LT}) en relación con la tendencia de valores de la bibliografía (Tabla 1). ρ_{CH} = Densidad; MM = Multimaterial; ms = Madera sólida.

4. Conclusiones

Se observa un incremento en la densidad y el módulo de rigidez del multimaterial en comparación con la madera sólida. Igualmente, a medida que la densidad se incrementa, el módulo de rigidez experimenta un incremento proporcional. La densidad no constituye en todas las instancias un predictor fiable del módulo de rigidez. La interpretación de estos datos requiere la identificación detallada de cada tipo de madera. Una vez que se tenga esta información, se pueden sugerir patrones de comportamiento para una especie en particular y para grupos de especies que muestren tendencias similares.

El multimaterial caracterizado tiene como objetivo convertir las características naturales de la madera en un producto manufacturado con un módulo de rigidez optimizado, y simultáneamente reducir la variabilidad natural del material constitutivo. En comparación con la madera sólida, se percibe el multimaterial como una mejora tecnológica para su integración en la producción de productos y componentes estructurales.

5. Agradecimientos

La investigación fue patrocinada por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México y por el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías, México. Una versión preliminar del manuscrito fue presentada en formato de cartel en el III Congreso Ibero-Latinoamericano de la madera en la construcción, en Madrid, España, en junio de 2024.

6. Referencias

- American Society for Testing and Materials. (2015a). ASTM C1259-15. Standard test method for dynamic Young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio for advanced ceramics by impulse excitation of vibration. American Society for Testing and Materials (ASTM), West Conshohocken, U.S.A.
- American Society for Testing and Materials. (2015b). ASTM E1876-15. Standard test method for dynamic Young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio by impulse excitation of vibration. American Society for Testing and Materials (ASTM), West Conshohocken, U.S.A.

- American Society for Testing and Materials. (2021). ASTM D905-08(2021). Standard Test Method for Strength Properties of Adhesive Bonds in Shear by Compression Loading. American Society for Testing and Materials (ASTM), West Conshohocken, U.S.A.
- Asdrubali, F.; Ferracuti, B.; Lombardi, L.; Guattari, C.; Evangelisti, L.; Grazieschi, G. (2017). A review of structural, thermo-physical, acoustical, and environmental properties of wooden materials for building applications. *Building and Environment*, 114:307-332. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.12.033>
- Campilho, R.D.S.G.; De Moura, M.F.S.F.; Barreto, A.M.J.P.; Morais, J.J.L.; Domingues, J.J.M.S. (2010). Experimental and numerical evaluation of composite repairs on wood beams damaged by cross-graining. *Construction and Building Materials*, 24(4):531-537. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.006>
- Cañola, H.D.; Echavarría, C.; Echavarría, B. (2018). Glulam beams reinforced with punched metal plates. *DYNA*, 85(204):127-133. <https://doi.org/10.15446/dyna.v85n204.67847>
- Caruso, M.C.; Menna, C.; Asprone, D.; Prota, A.; Manfredi, G. (2017). Methodology for Life-Cycle Sustainability Assessment of Building Structures. *ACI Structural Journal*, 114(2):323-336. <https://doi.org/10.14359/51689426>
- Cavalli, A.; Cibecchini, D.; Goli, G.; Togni, M. (2017). Shear modulus of old timber. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 10:446-450. <https://doi.org/10.3832/ifor1787-009>
- Cha, J.K. (2015). Determination of true modulus of elasticity and modulus of rigidity for domestic woods with different slenderness ratios using nondestructive tests. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, 43(1):36-42. <https://doi.org/10.5658/WOOD.2015.43.1.36>
- Dietsch, P.; Brandner, R. (2015). Self-tapping screws and threaded rods as reinforcement for structural timber elements – A state-of-the-art report. *Construction and Building Materials*, 97:78-89. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.028>
- Gáborik, J.; Gaff, M.; Ruman, D.; Záborský, V.; Kašíčková, V.; Sikora, A. (2016). Adhesive as a factor affecting the properties of laminated Wood. *BioResources*, 11(4):10565-10574. <https://doi.org/10.15376/biores.11.4.10565-10574>
- International Organization for Standardization. (2014). 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.
- International Organization for Standardization. (2014). 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.
- Jacob, M.; Harrington, J.; Robinson, B. (2018). The Structural Use of Timber Handbook for Eurocode 5: Part 1-1. COFORD.
- Jasieńko, J.; Nowak, T.P. (2014). Solid timber beams strengthened with steel plates – Experimental studies. *Construction and Building Materials*, 63:81-88. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.020>
- Jorge, F.C.; Pereira, C.; Ferreira, J.M.F. (2004). Wood-cement composites: a review. *Holz als Rohund Werkstoff*, 62:370-377. <https://doi.org/10.1007/s00107-004-0501-2>
- Kohl, D.; Long, T.H.N.; Böhm, S. (2017). Wood-Based Multi-Material Systems for Technical

- Applications – Compatibility of Wood from Emerging and Developing Countries. *Procedia Manufacturing* 8:611-618. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.02.078>
- Kránitz, K.; Deublein, M.; Niemz, P. (2014). Determination of dynamic elastic moduli and shear moduli of aged wood by means of ultrasonic devices. *Materials and Structures* 47(6):925-936. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0103-8>
- Krüger, R.; Wagenführ, A. (2020). Comparison of methods for determining shear modulus of Wood. *European Journal of Wood and Wood Products* 78:1087-1094. <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01565-2>
- Kusnindar; Dewi, S.M.; Soehardjono, A.; Wisnumurti. (2018). Performance of glue laminated timber beams composed of sengon wood (*Albizia falcatara*) and coconut wood (*Cocos nucifera*) with nylon-threads reinforcement. *MATEC Web of Conferences* 195:02029. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819502029>
- Macedo Alquicira, I.; Sotomayor Castellanos, J.R. (2021). Densidad, velocidad del ultrasonido y módulo dinámico de madera sólida y laminada de *Pinus pseudostrobus*. *Madera y Bosques*, 27(3):e2732235, 1-14. <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2732235>
- Macedo Alquicira, I.; Bedolla Arrollo, J.; Raya González, D.; Rutiaga Quiñones, J.G.; Castro Sánchez, F.J.; Sotomayor Castellanos, J.R. (2022). Pruebas de torsión dinámica de madera sólida y de multimaterial de *Fagus crenata*. *Bosques Latitud cero* 12:93-102. https://www.researchgate.net/publication/366734257_Pruebas_de_torsion_dinamica_de_madera_soliday_de_multimaterial_de_Fagus_crenata
- Milner, H.R. (2009). Sustainability of engineered wood products in construction. In *Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, Sustainability of Construction Materials* 184-212, Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9781845695842.184>
- Na, B.; Wang, Z.; Wang, H.; Lu, X. (2014). Wood-cement compatibility review. *Wood Research* 59(5):813-626. <http://www.woodresearch.sk/wr/201405/10.pdf>
- Nadir, Y.; Nagarajan, P.; Ameen, M.; Arif, M. (2016). Flexural stiffness and strength enhancement of horizontally glued laminated wood beams with GFRP and CFRP composite sheets. *Construction and Building Materials* 112:547-555. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.133>
- Nadir, Y.; Nagarajan, P.; Midhun, A.J. (2014). Measuring elastic constants of *Hevea brasiliensis* using compression and losipescu shear test. *European Journal of Wood and Wood Products* 72(6):749-758. <https://doi.org/10.1007/s00107-014-0842-4>
- Olsson, A.; Källsner, B. (2013). Shear modulus of structural timber evaluated by means of dynamic excitation and FE analysis. *Materials and Structures* 48(4):977-985. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0208-0>
- Ozyhar, T.; Hering, S.; Sanabria, S.J.; Niemz, P. (2013). Determining moisture-dependent elastic characteristics of beech wood by means of ultrasonic waves. *Wood Science and Technology* 47(2):329-341. <https://doi.org/10.1007/s00226-012-0499-2>
- Qi, Y.; Xiong, W.; Liu, W.; Fang, H.; Lu, W. (2015). Experimental Study of the Flexural and Compression Performance of an Innovative Pultruded Glass-Fiber-Reinforced Polymer-Wood Composite Profile. *PLoS ONE* 10(10):e0140893. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0140893>

- 893
- Qiao, Q.; Yang, Z.; Mou, B. (2020). Experimental study on axial compressive behavior of CFRP confined square timber filled steel tube stub columns. *Structures* 24:823-834. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.02.007>
- Sotomayor Castellanos, J. R. (2015). Banco FITECMA de características físico-mecánicas de maderas mexicanas. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3497.4884>
- Rendón Correa, A.; Dorantes Hernández, F.; Mejía Valencia, S.; Alamilla Fonseca L. N. (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. México. <https://bioteca.biodiversidad.gob.mx/janimum/Documentos/15522.pdf>
- Rocco Lahr, F.A.; Christoforo, A.L.; Donizeti Varanda, L.; Chahud, E.; Almeida De Araujo, V.; Melgaço Nunes Branco, L.A. (2017). Shear and longitudinal modulus of elasticity in wood: relations based on static bending tests. *Acta Scientiarum. Technology* 39:433-437. <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v39i4.30512>
- Roohnia, M.; Kohantorabi, M. (2015). Dynamic methods to evaluate the shear modulus of wood. *BioResources* 10(3):4867-4876. <https://doi.org/10.15376/biores.10.3.4867-4876>
- Saba, N.; Jawaid, M.; Alothman, O.Y.; Paridah. M.T. (2016). A review on dynamic mechanical properties of natural fibre reinforced polymer composites. *Construction and Building Materials* 106:149-159. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.075>
- Silva Guzmán, J.A.; Fuentes Talavera, F.J.; Rodríguez Anda R.; Torres Andrade, P.A.; Lomelí Ramírez, M.A.; Ramos Quirarte, J.; Waitkus, C.; Richter, H.G. (2010). Fichas de propiedades tecnológicas y usos de maderas nativas de México e importadas. Comisión Nacional Forestal. Guadalajara. http://centro.paot.org.mx/documentos/conafor/catalogo_maderas.pdf
- Sotomayor Castellanos, J.R. (2016). Dynamic modulus of rigidity of seven types of Mexican wood determined by torsional vibration. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 22(2):125-134. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2015.03.008>
- Sotomayor Castellanos, J.R. (2018). Características dinámicas de 22 maderas determinadas por el método de vibraciones transversales. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 48:1-24. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i48.150>
- Sotomayor Castellanos, J.R. (2024). Estudio comparativo de módulos de rigidez de tres maderas mexicanas y tres maderas japonesas. *Ingenierías* 27(96):39-48. <https://doi.org/10.29105/ingenierias27.96-950>
- Steiger, R.; Serrano, E.; Stepinac, M.; Rajčić, V.; O'Neill, C.; McPolin, D.; Widmann, R. (2015). Strengthening of timber structures with glued-in rods. *Construction and Building Materials* 97:90-105. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.097>
- Stoeckel, F.; Konnerth, J.; Gindl-Altmatter, W. (2013). Mechanical properties of adhesives for bonding wood - A review. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 45:32-41. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2013.03.013>
- Tamarit Urias, J.C.; López Torres, J.L. (2007). Xilotecología de los principales árboles tropicales de México. INIFAP. México. https://www.researchgate.net/profile/Juan-Carlos-Urias/publication/339936736_XILOTECNOL

OGIA_DE_LOS_PRINCIPALES_ARBOLES_TR
OPICALES_DE_MEXICO/links/5e6d6e0ea6f
dccb994ca193a/XILOTECNOLOGIA-DE-LOS-
PRINCIPALES-ARBOLES-TROPICALES-DE-
MEXICO.pdf

Wang, Z.; Xie, W.; Wang, Z.; Cao, Y. (2018). Strain method for synchronous dynamic measurement of elastic, shear modulus and Poisson's ratio of wood and wood composites. *Construction and Building Materials* 182:608-619. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.139>