



Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riit.com.mx

Vibraciones transversales para determinar el módulo dinámico e índice material en multimaterial de madera-malla-adhesivo en *Fagus crenata*

Transverse vibrations to determine the dynamic modulus and material index in wood-mesh-adhesive multimaterial in *Fagus crenata*

Sotomayor-Castellanos, J.R.*, Macedo-Alquicira, I.

Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera; Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo; Ciudad. Universitaria, C.P. 58180, Morelia, Michoacán.

*madera999@yahoo.com; macedoisarael@gmail.com

Innovación tecnológica: Mejoramiento de las propiedades físicas y mecánicas de la madera.

Área de aplicación industrial: Fabricación de componentes para las industrias del mueble, automotriz, embalaje y de la construcción.

Recibido: 09 agosto 2022

Aceptado: 26 marzo 2023

Abstract

Wood used in the furniture and construction industries is a heterogeneous, hygroscopic, anisotropic and biodegradable substance. These natural properties limit its use as an architectural and engineering material and condition the rational use of timber species with mechanical characteristics that do not meet the design criteria stipulated in the regulations. The hypothesis of this research proposes that the transformation of *Fagus crenata* solid wood into a multi-material wood-mesh-adhesive increases its dynamic modulus and its material index. In addition, this technological improvement decreases its natural variability. The objective of the research was to determine the density, frequency, dynamic modulus and quality index in a statistically representative sample of *F. crenata* specimens and to contrast them with the same parameters, but determined in specimens of the multi-material made of the same species. Transverse vibration tests were carried out on small specimens of *F. crenata* and their moisture content, densities, frequencies, dynamic moduli and quality indexes were determined. The main results are: a decrease in the coefficient of variation in the density of the multi-material by 24,1% with respect to that of solid wood. Density is not a good predictor of dynamic modulus ($R^2 = 0,21$), but frequency is (R^2

= 0,94). The density of the multi-material increases 4,3% compared to that of solid wood. The dynamic modulus of the multi-material increases 8,5% with respect to that of solid wood. The multi-material reduces the variability of the dynamic modulus -54,7%. The magnitude of the material index of the multi-material increases 4,0% with respect to that of solid wood. These results are restricted by the experimentation of homogeneous and statistically representative samples of *F. crenata* wood and wood-mesh-adhesive multi-material and are valid for the particular conditions of the methodology used in this research.

Keywords: moisture content, density, frequency, *Fagus crenata*.

Resumen

La madera empleada en las industrias del mueble y de la construcción es una sustancia heterogénea, higroscópica, anisotrópica y biodegradable. Estas propiedades naturales limitan su empleo como material de arquitectura e ingeniería y condicionan el aprovechamiento racional de especies maderables con características mecánicas que no satisfacen los criterios de diseño estipulados en la normatividad. La hipótesis de esta investigación propone que la transformación de madera sólida de *Fagus crenata* en un multimaterial madera-malla-adhesivo incrementa su módulo dinámico y su índice material. Además, esta mejora tecnológica disminuye su variabilidad natural. El objetivo de la investigación fue determinar la densidad, la frecuencia, el módulo dinámico e índice de calidad en una muestra estadísticamente representativa de probetas de *F. crenata* y contrastarlos con los mismos parámetros, pero determinados en probetas del multimaterial elaborado con la misma especie. Se realizaron pruebas de vibraciones transversales en probetas de pequeñas dimensiones de *F. crenata* y se determinó su contenido de humedad, densidades, frecuencias, módulos dinámicos e índices de calidad. Los principales resultados son: una disminución del coeficiente de variación en la densidad del multimaterial en 24,1% respecto al de la madera sólida. La densidad no es un buen predictor del módulo dinámico ($R^2 = 0,21$), pero si la frecuencia ($R^2 = 0,94$). La densidad del multimaterial aumenta 4,3% respecto al de la madera sólida. El módulo dinámico del multimaterial aumenta 8,5% respecto al de la madera sólida. El multimaterial reduce la variabilidad del módulo dinámico -54,7%. La magnitud del índice material del multimaterial aumenta 4,0% respecto al de la madera sólida. Estos resultados están restringidos por la experimentación de muestras homogéneas y estadísticamente representativas de la madera de *F. crenata* y del multimaterial madera-malla-adhesivo y son válidos para las condiciones particulares de la metodología empleada en esta investigación.

Palabras clave: contenido de humedad, densidad, frecuencia, *Fagus crenata*.

1. Introducción

Las piezas de madera con aplicaciones comerciales tienen dimensiones y formas limitadas por la geometría del árbol y cuentan

con una estructura anatómica porosa y ordenada en capas de crecimiento alrededor de su eje principal [1,2]. Como resultado, la madera es heterogénea, higroscópica,

anisotrópica y biodegradable. Estas propiedades limitan su empleo como material de arquitectura e ingeniería y condicionan el aprovechamiento racional de especies maderables con características mecánicas que no satisfacen los criterios de diseño estipulados en la normatividad [3]. Para competir con otras materias primas, la madera como insumo y/o producto industrial debe ser un material lo más homogéneo e isotrópico posible, resistente a la humedad y al deterioro, así como garantizar la precisión en sus parámetros mecánicos [4-7].

Estos argumentos implican la caracterización de la madera especie por especie y está sujeta a las condiciones de ensayo, así como reportar datos derivados de un tamaño de muestra estadísticamente representativa. Una vez que se cuente con esta información, es posible proponer tendencias sobre el comportamiento general para una especie en específico y/o por agrupamiento de varias de ellas que denoten una tendencia similar [8-9].

Para transitar de la percepción de la madera como una materia prima hacia su apreciación como un material de ingeniería, se han desarrollado tres vertientes tecnológicas. La primera es la modificación de la madera sólida empleando técnicas de secado, protección, densificado, plastificado, así como tratamientos térmicos [10-14]. De esta manera, se mejoran sus características tecnológicas naturales y se amplía el uso potencial de especies de baja apreciación en el mercado.

La segunda orientación es la elaboración de materiales compuestos de madera que reconstituyen la geometría y la estructura natural de la madera a partir de fibras y/o astillas [15], placas [16] y láminas [17-18], las cuales son combinadas con nanomateriales [19-20], resinas [21], plásticos reforzados [22], polímeros reforzados con fibra de carbono [23-25],

concreto [26-27] y/o resinas [28-29]. Estas tecnologías aumentan las propiedades de resistencia mecánica y de servicio de la madera y sus derivados.

El tercer enfoque es reforzar piezas de madera sólida y/o laminada con metales [30-31], cementos [32-33], fibras naturales [34] y/o sintéticas [35-37], y consolidarlos con resinas y/o adhesivos [29, 38] y/o componentes mecánicos [39-45]. Así, al combinar las propiedades físico-mecánicas de cada componente, se logra incrementar su resistencia mecánica y, al incorporar sustancias protectoras, decrece su biodeterioro y se mejora su estabilización dimensional. Como corolario, existen amplias posibilidades para el diseño mecánico de compuestos, laminados y multimateriales que tienen propiedades similares a la madera sin disminución de sus propiedades estéticas, ambientales y sustentables [46-48].

Los parámetros técnicos de la madera están especificados para una especie y se le asocia una densidad, un contenido de humedad y una dirección de anisotropía. Igualmente, cada parámetro se tabula acompañado de un valor medio, su desviación estándar y un coeficiente de variación. De tal forma que el ingeniero y el arquitecto pueden calcular y diseñar proyectos con geometrías y formas que diversifican el uso de la madera aserrada transformándola en material de ingeniería [49-52] y arquitectura [36, 53-55].

Las características requeridas por la normatividad para el uso de materiales de madera son determinadas con tres perspectivas. La primera son las normas para piezas de madera con dimensiones de empleo [56-57]; la segunda perspectiva es el estudio de probetas de pequeñas dimensiones con procedimientos igualmente normalizados [58-60]; el tercer enfoque es la experimentación con protocolos especiales

para cada caso de estudio [61-62]. Por otra parte, esta caracterización mecánica se realiza en condiciones de carga estática [63-64] y/o dinámica [65-67]. Es en esta segunda modalidad que los métodos no destructivos encuentran aplicación.

Las vibraciones mecánicas permiten medir la frecuencia natural de una probeta de madera. A partir de la frecuencia, de su masa y de su geometría, se puede determinar el módulo dinámico sin modificar la estructura física de una pieza de madera [62, 68-70]. Este parámetro es necesario en el cálculo ingenieril y en el diseño arquitectural. Igualmente, se utiliza para la clasificación mecánica entre especies. Sin embargo, el módulo dinámico no puede por sí solo posicionar a una especie de madera como un material idóneo para una función estructural y/o de servicio. Así, se hace necesario introducir el índice material de la madera [71-73]. Este parámetro permite ponderar el módulo dinámico por la densidad y de esta forma homogeneizar el indicador como criterio de diseño.

Otro enfoque para el estudio de las características mecánicas de la madera y los compuestos de madera es el método del elemento finito [25, 74-75] y sus aplicaciones en la manufactura de compuestos de madera [76]. Esta visión prospecta un gran potencial para el diseño estructural informatizado, así como para las propuestas de madera flexible [12] y súper material [77].

La madera de *Fagus crenata* Blume es ampliamente utilizada en la fabricación de muebles, en la industria de la construcción y otros productos de madera de valor agregado [78-79]. Sus módulos de elasticidad determinados en condiciones estáticas divulgados en la bibliografía son: $E_R = 882 \text{ MN m}^{-2}$, $E_T = 588 \text{ MN m}^{-2}$ y $E_L = 11760 \text{ MN m}^{-2}$; los módulos de rigidez son: $G_{LR} = 980 \text{ MN m}^{-2}$, $G_{LT} = 637 \text{ MN m}^{-2}$ y $G_{RT} = 196 \text{ MN}$

m^{-2} para una densidad de $740 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ y un contenido de humedad de 8% [78]. Los módulos dinámicos por ultrasonido (us) son: $E_{us R} = 2644 \text{ MN m}^{-2}$, $E_{us T} = 1949 \text{ MN m}^{-2}$ y $E_{us L} = 13992 \text{ MN m}^{-2}$ para una densidad de 629 kg m^{-3} y un contenido de humedad de 11% [79]. Los subíndices indican la dirección radial (R), tangencial (T) y longitudinal (L) de la madera. No se detectó información acerca del módulo dinámico determinado por vibraciones transversales. Igualmente, y dada la novedad en la configuración del multimaterial madera-malla-adhesivo, no se localizó información sobre su caracterización para la especie en estudio.

Información técnica sobre multimateriales a base de madera está documentada en [50-51, 80]. La caracterización de adhesivos a base de poliuretano y su interacción con madera sólida y con compuesto de madera están reportados en la bibliografía [28-29, 81-82].

La hipótesis de la investigación propone que la transformación de madera sólida en un multimaterial madera-malla-adhesivo aumenta su módulo dinámico y su índice material. Para verificar esta hipótesis el objetivo de la investigación fue determinar la densidad aparente al momento del ensayo, la frecuencia y los dos parámetros referidos en una muestra estadísticamente representativa de probetas de pequeñas dimensiones de *F. crenata* y contrastarlos con los mismos parámetros, pero determinados en probetas del multimaterial elaborado con la misma especie.

2. Materiales y métodos

2.1. Materiales

Conceptualmente, el multimaterial es una membrana, representada por la malla de acero galvanizada, arropada y/o protegida por dos elementos aislantes y/o protectores de un biomaterial y ambos unidos por un adhesivo *ex profeso*. Esta membrana puede ser

remplazada por uno o varios elementos metálicos, plásticos, biológicos y de fibras naturales y/o sintéticas, los cuales puedan almacenar, disipar y/o transmitir información codificada, por ejemplo, un material aislante de sonido y/o temperatura, un material sensible al movimiento, así como circuitos electrónicos. El adhesivo puede ser sustituido por otro tipo de pegamentos naturales y/o polímeros sintéticos que sean apropiados de acuerdo a las funciones para las cuales se diseñe el multimaterial [80].

Se prepararon dos grupos de probetas a partir de un mismo lote de madera de duramen de la especie *F. crenata*. El primer grupo consistió en 36 probetas de madera sólida con dimensiones de 0,01 m $\times$ 0,03 m $\times$ 0,15 m orientadas en las direcciones radial (espesor), tangencial (ancho) y longitudinal (largo) respectivamente; la madera no contenía defectos de crecimiento. Para el segundo grupo se elaboraron 36 probetas de multimaterial compuesto de dos elementos de madera acomodados ortogonalmente, más

una malla de acero con espesor de 0,92 mm localizada entre las dos maderas; los tres componentes fueron ensamblados con un adhesivo de poliuretano aplicando 200 kg m⁻² de presión y una temperatura de 90 °C durante 90 minutos hasta que se consolida el multimaterial.

Las dimensiones del multimaterial fueron: espesor 0,02 m (dos piezas de madera sólida de 0,01 m), ancho 0,03 m y largo 0,15 m. El espesor y el ancho coinciden con las direcciones radial y tangencial. Los dos componentes de madera están colocados con una rotación de 90° respecto a la dirección longitudinal, lo que resulta en un laminado de dos capas cruzadas perpendicularmente (Figura 1). Todas las probetas se almacenaron en una cámara de acondicionamiento con temperatura de 20 °C ($\pm$ 2 °C) y humedad relativa del aire de 65% ($\pm$ 1 °C) hasta que alcanzaron su contenido de humedad en equilibrio de 10% para la madera sólida y de 8% para el multimaterial.

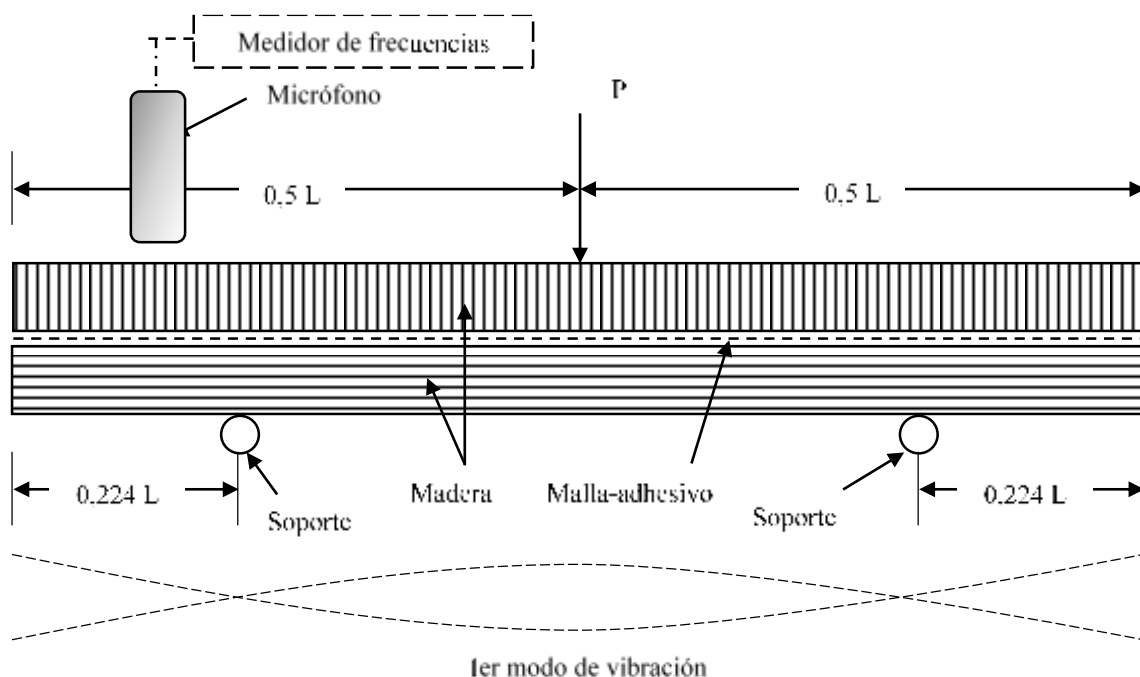


Figura 1. Configuración de las pruebas de vibraciones transversales. Probeta de multimaterial.

El contenido de humedad (CH) de las probetas se determinó con la diferencia entre el peso al momento del ensayo y el peso de la probeta en estado seco, adaptando la norma ISO 13061-1:2014 [58]. La densidad de la madera (ρ_{CH}), correspondiente a un contenido de humedad (CH) (8% en madera sólida y 10% en multimaterial), se calculó con el cociente del peso de la madera y el volumen acondicionados de esta al momento del ensayo, adaptando la norma ISO 13061-2:2014 [59].

2.2. Métodos

Las pruebas de vibraciones transversales consistieron en medir la frecuencia natural de vibración perpendicular a la dirección longitudinal de la probeta [70]. Con tal propósito, se utilizó el medidor de frecuencia *Grindosonic*®. El movimiento de las probetas se inició con un impacto elástico empleando un bastón flexible de 30 g de peso (Figura 2). Las vibraciones fueron registradas con un micrófono y las frecuencias naturales en el primer modo de vibración se leyeron directamente en el aparato con una precisión de 1 Hz. Se realizaron tres impactos y su promedio se consideró como frecuencia.



Figura 2. Pruebas de vibraciones transversales. Probeta de madera sólida.

La cara superior del multimaterial se alineó en la dirección tangencial de la madera mientras que la cara inferior se orientó en la dirección longitudinal. En cada prueba se realizaron tres impactos en el lado superior de la probeta y su promedio se consideró como la frecuencia en la posición A. Una vez terminada la prueba en la posición A, se giró la probeta 180° alrededor de su eje longitudinal y se repitió la experiencia. A esta medición se le consideró como la frecuencia en la posición B. De esta forma, se midieron dos frecuencias por probeta.

Los ensayos dinámicos no destructivos consistieron en el estudio de la probeta modelada como una barra continua, de sección transversal rectangular, con geometría uniforme y estructuralmente homogénea, sometida a vibración transversal sobre apoyos simples e idealizando la madera como un material elástico. Así, el análisis modal se realizó a partir de la ecuación de movimiento (1) [83] en vibraciones transversales de una barra equivalente a la probeta presentada en las Figuras 1 y 2.

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + m_1 \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - \left(m_1 r^2 + \frac{EI m_1}{K' AG} \right) \frac{\partial^4 y}{\partial x^2 \partial t^2} + \frac{m_1^2 r^2}{K' AG} \frac{\partial^4 y}{\partial t^4} = 0 \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

E = Módulo de elasticidad de la madera (N m^{-2})

I = Momento de inercia de la sección transversal de la probeta (m^4)

m_l = Masa por unidad de longitud de la probeta (kg m^{-1})

A = Área de la sección transversal de la probeta (m^2)

G = Módulo de rigidez de la madera (N m^{-2})

y = Desplazamiento en la dirección transversal de la probeta (m)

x = Distancia en la dirección longitudinal de la probeta (m)

t = Tiempo (s)

K' = Factor de forma en cortante. (0,833 para probetas prismáticas)

r = Radio de giro de la sección transversal de la probeta (m^2), con: $r = \sqrt{I/A}$

En la ecuación (1), el primer término de la izquierda está ligado a la rigidez de la probeta, el segundo a la inercia del movimiento, el tercer término representa el efecto de la inercia de rotación de la sección transversal de la probeta y el cuarto significa el efecto del esfuerzo cortante interno. Una solución numérica de la ecuación (1) para el caso de una probeta de sección rectangular, apoyada sobre soportes rígidos de tipo simple-simple, ha sido aplicada en estudios con madera por [62]. Con esta ecuación (2) se calculó el módulo dinámico:

$$E_{vt} = \frac{4 \pi^2 L^4 f^2 \rho_{CH}}{m^4 r^2} \times \left[1 + \frac{r^2}{L_{vt}^2} K \right] \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

E_{vt} = Módulo dinámico (N m^{-2})

L = Longitud de la probeta (m)

L_{vt} = Distancia entre apoyos (m)

f = Frecuencia natural (Hz)

ρ_{CH} = Densidad (kg m^{-3})

r = Radio de giro de la sección transversal de la probeta (m^2)

m, K = Constantes adimensionales (12,65; 49,48)

El índice material se calculó con la ecuación (3) [72]:

$$I_{vt} = \frac{E_{vt}}{\rho_{CH}} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

I_{vt} = Índice material ($\text{m}^2 \text{s}^{-2}$)

E_{vt} = Módulo dinámico (N m^{-2})

ρ_{CH} = Densidad (kg m^{-3})

2.3. Diseño experimental

Se preparó un diseño completamente al azar y balanceado. La unidad experimental consistió en dos grupos de probetas. Uno de madera sólida y otro de multimaterial. Las variables de respuesta fueron la densidad, la frecuencia, el módulo dinámico (Ecuación 2) y el índice material (Ecuación 3). La elaboración del multimaterial se considera el tratamiento. Para las ocho muestras (cuatro variables $\times$ dos grupos) se calcularon su media (μ), su desviación estándar (σ) y su coeficiente de variación ($CV = \sigma/\mu$). Para verificar la uniformidad de las mediciones entre las frecuencias medidas en las posiciones A y B, se realizó una prueba t de diferencias de medias suponiendo varianzas iguales con la hipótesis nula $H_0: \mu_{fA} = \mu_{fB}$ donde los subíndices se refieren a las frecuencias medidas en las posiciones A y B. Para cada par de muestras independientes (multimaterial versus madera sólida) se realizaron igualmente pruebas t de diferencias

de medias con la hipótesis nula $H_0: \mu_{ms} = \mu_{MM}$ donde los subíndices ms se refieren a datos de la madera sólida y MM a los del multimaterial. Las pruebas estadísticas se realizaron para un nivel de confianza de 95%. Así, el criterio de demarcación fue aceptar diferencias significativas para valores de $P_{(\alpha =$

$0,05) < 0,05$. Se calcularon correlaciones lineales ($y = ax + b$) de los módulos dinámicos como variable dependiente de la densidad y de la frecuencia. Finalmente, se compararon los resultados de esta investigación con los reportados en la bibliografía (Tabla 1).

Tabla 1. Densidad, módulo dinámico e índice material de maderas mexicanas [84].

No.	Especie	ρ_{CH} (kg m^{-3})	E_{vt} (MN m^{-2})	I_{vt} ($\text{m}^2 \text{s}^{-2}$)
1	<i>Abies religiosa</i>	462	7178	15,5
2	<i>Acacia farnesiana</i>	901	13965	15,5
3	<i>Acosmium panamense</i>	1005	16045	16,0
4	<i>Albizia plurijuga</i>	844	13993	16,6
5	<i>Alnus acuminata</i>	541	11436	21,1
6	<i>Andira inermis</i>	658	8843	13,4
7	<i>Caesalpinia platyloba</i>	825	13681	16,6
8	<i>Cedrela odorata</i>	529	8051	15,2
9	<i>Cordia elaeagnoides</i>	878	13536	15,4
10	<i>Cupressus lindleyi</i>	486	8034	16,5
11	<i>Dalbergia granadillo</i>	1147	20236	17,6
12	<i>Dalbergia paloescrito</i>	833	11569	13,9
13	<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	467	6224	13,3
14	<i>Fagus mexicana</i>	642	10178	15,9
15	<i>Fraxinus americana</i>	631	10901	17,3
16	<i>Fraxinus uhdei</i>	603	10250	17,0
17	<i>Guazuma ulmifolia</i>	730	8765	12,0
18	<i>Gyrocarpus americanus</i>	395	5340	13,5
19	<i>Juglans pyriformis</i>	728	12187	16,7
20	<i>Lysiloma acapulcensis</i>	893	13269	14,9
21	<i>Pinus douglasiana</i>	538	13828	25,7
22	<i>Pinus pseudostrobus</i>	516	14120	27,4
23	<i>Platymiscium dimorphandrum</i>	866	14077	16,3
24	<i>Psidium sartorianum</i>	789	8906	11,3
25	<i>Quercus scytophylla</i>	852	13922	16,3
26	<i>Quercus spp.</i>	791	14972	18,9
27	<i>Spathodea campanulata</i>	344	3133	9,1
28	<i>Swietenia humilis</i>	757	9098	12,0
29	<i>Swietenia macrophylla</i>	531	8548	16,1
30	<i>Tabebuia chrysantha</i>	1096	17131	15,6
31	<i>Tabebuia donnell-smithii</i>	598	8342	13,9
32	<i>Tabebuia rosea</i>	621	10660	17,2
33	<i>Tilia mexicana</i>	442	8610	19,5

ρ_{CH} = Densidad; E_{vt} = Módulo dinámico; I_{vt} = Índice material $\times 10^6$.

Para calificar la intensidad de las correlaciones se utilizaron los siguientes valores del coeficiente de determinación: correlación muy alta: $1 \geq R^2 \geq 0,9$; correlación alta: $0,9 > R^2 \geq 0,7$; correlación media: $0,7 > R^2 \geq 0,4$; correlación baja: $0,4 > R^2 \geq 0,2$; y correlación nula: $R^2 < 0,2$. No obstante que el número de probetas

observadas por cada especie fue de 36, cantidad suficiente para considerar en el análisis estadístico la teoría de las grandes muestras, se calculó *a posteriori* el tamaño de la muestra necesario para validar las pruebas estadísticas para un error aceptable del 0,05. El número de probetas se calculó con la ecuación (4) [85].

$$n = 2 \sigma^2 / e^2 \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:

n = Tamaño de la muestra

σ = Desviación estándar

e = Error de estimación aceptable (0,05).

3. Resultados y discusión

Para las frecuencias medidas al girar las probetas del multimaterial, la prueba de diferencias de medias resultó con un valor de $P_{(\alpha=0,05)} = 0,961$ lo que indica que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las frecuencias medidas en cada una de las dos caras de las probetas.

Este resultado se puede explicar con los argumentos siguientes: las dos láminas de las probetas están colocadas ortogonalmente en relación con las direcciones longitudinal y tangencial de la madera, de tal forma que, durante un ciclo de movimiento, la lámina inferior está solicitada en tensión en la dirección longitudinal, mientras que la lámina superior trabaja en la dirección tangencial, sin embargo, durante un semi-ciclo del primer modo de vibración las distribuciones de los esfuerzos de flexión son principalmente de tensión en la lámina inferior y de compresión en la lámina superior y al completar un ciclo el estado de esfuerzo es opuesto.

Respecto al eje neutro de las probetas, es ahí donde los esfuerzos y deformaciones son máximos y se concentran en la capa formada por la malla y el adhesivo [83]. De tal forma,

en cada ciclo la sollicitación oscila y la frecuencia es simétrica, independientemente de la posición de la probeta. En consecuencia, para el cálculo subsecuente del módulo dinámico y del índice material derivado, se considera el promedio de las dos frecuencias medidas como uno solo y correspondiente a cada probeta.

La caracterización del comportamiento mecánico de la madera con vibraciones transversales es de carácter no destructivo y utiliza la hipótesis fundamental en mecánica de la madera propuesta por [86] acerca de que la madera y los productos fabricados con ella pueden almacenar y disipar energía. Por ejemplo, la propiedad de la madera de almacenar energía es manifestada por la velocidad a la cual una onda mecánica viaja a través de ella.

En contraste, la capacidad de la madera para atenuar una onda mecánica denota su capacidad para disipar energía. Este autor propuso así la hipótesis de que estas propiedades era para almacenar y disipar energía están controladas por los mismos mecanismos que determinan su comportamiento mecánico en condiciones estáticas. Es decir, la estructura molecular y anatómica del material es la base del comportamiento mecánico de la madera. Como consecuencia, es posible relacionar estadísticamente estas propiedades utilizando

métodos de análisis numéricos como las correlaciones estadísticas.

3.1. Tamaño de la muestra

El número de 36 probetas observadas para cada variable de respuesta fue suficiente para considerar la teoría de las grandes muestras

en el análisis. Los tamaños de la muestra calculados con la ecuación (4) indican que el número de unidades observadas satisface también el número de observaciones para las ocho muestras (Tabla 2). Es decir, las mediciones fueron realizadas en muestras homogéneas y representativas.

Tabla 2. Tamaño de las muestras.

Especies	e	ρ_{CH}	f	E_{vt}	I_{vt}
	-	n	n	n	n
Madera sólida	0,05	2	9	35	33
Multimaterial	0,05	1	1	7	6

e = Error de estimación aceptable; ρ_{CH} = Densidad; f = Frecuencia; E_{vt} = Módulo dinámico; I_{vt} = Índice material; n = Tamaño de la muestra.

El número de mediciones necesarias para satisfacer el error aceptable de la densidad y de la frecuencia requieren pocas probetas en comparación con las del módulo dinámico y del índice material. Este fenómeno es más intenso en la madera sólida que en el multimaterial. Se distinguen dos casos límite para la madera sólida: el módulo dinámico y el índice material. Estos dos parámetros son calculados con las ecuaciones (2) y (3) a partir de las mediciones directas de la densidad y de la frecuencia. En cambio, el módulo dinámico y el índice material son variables derivadas donde la densidad y la frecuencia están implícitas.

3.2. Densidades

La prueba de diferencia de medias indica desigualdades estadísticamente significativas ($P_{(\alpha=0,05)} < 0,001$) entre las densidades. Así, la densidad del multimaterial aumenta 4,3% respecto a la de la madera sólida. Esta diferencia puede explicarse por el peso adicional del pegamento y de la malla en el multimaterial.

En contraparte, el coeficiente de variación de la densidad del multimaterial disminuye 24,1% respecto al coeficiente de la madera sólida. Este resultado indica que el multimaterial reduce la variabilidad natural de la madera de *F. crenata* (Tabla 3).

Tabla 3. Densidad, frecuencia, módulo dinámico e índice material de madera sólida y multimaterial.

	ρ_{CH}	f	E_{vt}	I_{vt}
	(kg m ⁻³)	(Hz)	(MN m ⁻²)	(m ² s ⁻²)
Madera sólida de <i>Fagus crenata</i>				
μ	637	1934	13,573	21,31
σ	22	147	2,003	3,07
CV (%)	(3,5)	(7,6)	(14,8)	(14,4)
Multimaterial				
μ	664	2019	14,725	22,16
σ	17	60	984	1,31
CV (%)	(2,6)	(3,0)	(6,7)	(5,9)

ρ_{CH} = Densidad; f = Frecuencia; E_{vt} = Módulo dinámico; I_{vt} = Índice material $\times 10^6$; μ = Media; σ = Desviación estándar; CV = Coeficiente de variación en por ciento.

Las correlaciones entre la densidad y el módulo dinámico (Figura 3) indican un coeficiente de determinación del multimaterial cinco veces mayor que el correspondiente a la madera sólida; y los coeficientes de determinación califican el

multimaterial con una correlación baja y nula para la madera sólida de *F. crenata*. Es decir, en el contexto de la presente investigación, la densidad no es un buen predictor del módulo dinámico.

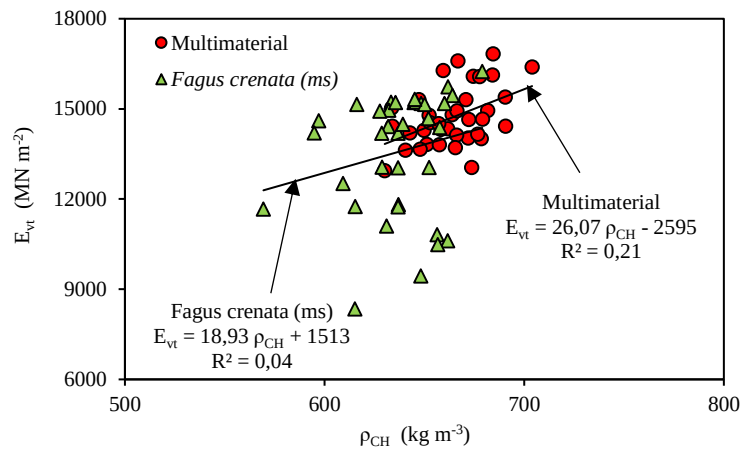


Figura 3. Correlaciones del módulo dinámico (E_{vt}) en función de la densidad (ρ_{CH}) de la madera sólida (*Fagus crenata* ms) y el multimaterial.

El módulo dinámico empleando frecuencias de vibraciones transversales con un aparato similar al de la presente investigación fue determinado por [70]. Estos autores reportan para las maderas *Azalia* sp ($\rho_{CH} = 754 \text{ kg m}^{-3}$), *Intsia* sp ($\rho_{CH} = 834 \text{ kg m}^{-3}$), *Astronium* sp ($\rho_{CH} = 817 \text{ kg m}^{-3}$) y *Millettia* sp ($\rho_{CH} = 835 \text{ kg m}^{-3}$) coeficientes de variación en la densidad de 4,7%, 8,9%, 7,7% y 10,2% respectivamente y para los módulos dinámicos de 10,6%, 9,7%, 14,9% y 15,4%. Estos valores son mayores a los de la densidad y del módulo dinámico de *F. crenata* ($\rho_{CH} = 637 \text{ kg m}^{-3}$) presentados en la Tabla 3. La diferencia puede ser atribuible a la variabilidad entre especies, pero las magnitudes de variación son aceptables en ciencias de la madera.

3.3. Frecuencias

Entre las frecuencias de la madera sólida y del multimaterial, la prueba de medias indica

diferencias estadísticamente significativas ($P_{(\alpha=0,05)} = 0,002$). Así, la frecuencia del multimaterial aumenta 4,4% respecto a la de la madera sólida. Este resultado se explica por las diferencias en dimensiones y masas entre las probetas de madera sólida y del multimaterial.

La frecuencia es un buen predictor del módulo dinámico. El coeficiente de determinación entre estos dos parámetros de la madera sólida califica la correlación como muy alta y para el multimaterial califica como alta (Figura 4). El rango de la frecuencia para la madera sólida es de 535 Hz (Tabla 3). En cambio, el rango correspondiente al multimaterial es de 253 Hz; es decir, 50,7% menor, porcentaje que indica que el multimaterial reduce la variabilidad de la frecuencia y se expresa en la disminución de 61,1% del coeficiente de variación del multimaterial respecto al de la madera sólida.

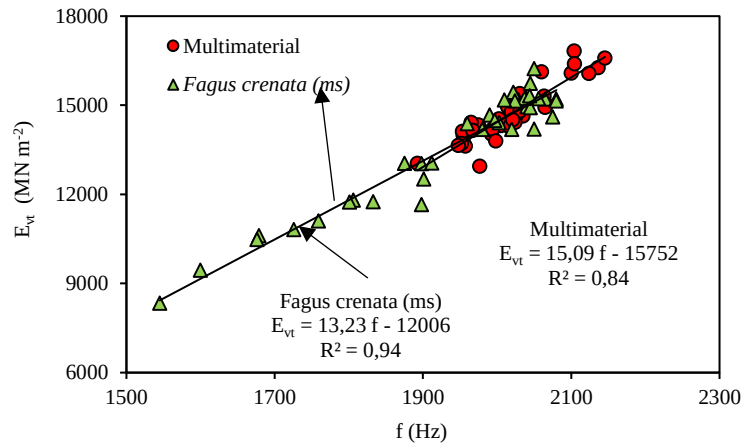


Figura 4. Correlaciones del módulo dinámico (E_{vt}) en función de la frecuencia (f) de la madera sólida (*Fagus crenata* ms) y el multimaterial.

3.4. Módulos dinámicos

La prueba de diferencias de medias entre los módulos dinámicos indica diferencias estadísticamente significativas ($P_{(\alpha=0,05)} = 0,003$). Así, el módulo dinámico del multimaterial aumenta 8,5% respecto a la de la madera sólida. Este resultado puede explicarse por el efecto del tratamiento de elaboración del multimaterial en el cual se adiciona la rigidez de la malla y su combinación con el adhesivo ligado mecánicamente con la madera de *F. crenata* [28].

El rango del módulo dinámico para la madera sólida es de 7896 MN m^{-2} . En cambio, el rango correspondiente al multimaterial es de 3886 MN m^{-2} , es decir, 50,7% menor. Este porcentaje indica que el multimaterial reduce la variabilidad del módulo dinámico y se expresa en la disminución de -54,7% del coeficiente de variación del multimaterial respecto al de la madera sólida. Este resultado coincide con el de la reducción en la variabilidad de la frecuencia. Así, si disminuye la variación en las mediciones de la frecuencia, se reduce la variación en el módulo dinámico.

La calidad de un sistema de clasificación de resistencia está determinada principalmente

por dos factores: la capacidad de los parámetros medidos para predecir el módulo dinámico y el error de medición de los parámetros predictores. El primero se puede cuantificar mediante análisis de regresión con el coeficiente de determinación (R^2) y el segundo mediante el coeficiente de variación (CV) que representa el error de medición.

Si el análisis de regresión se basa en mediciones realizadas en las mismas condiciones y el mismo aparato, el efecto del error de medición y el coeficiente de variación ya está incluido directamente en el valor R^2 . De lo contrario, si las mediciones se realizan en condiciones de laboratorio diferentes, el efecto del error de medición debe considerarse por separado, al evaluar la efectividad de un determinado sistema de clasificación de resistencia [87]. Este argumento permite proponer que, si dos variables indican una correlación fuerte, la precisión de sus mediciones o cálculo son aceptables. Al mismo tiempo, el incremento o disminución del coeficiente de variación es un indicador del aumento o de la disminución de la variabilidad de los parámetros determinados.

El coeficiente de variación representa la calidad de las mediciones. Sin embargo, este estadístico no explica de manera explícita el

origen de la variabilidad, en este caso, si se trata del error introducido por el instrumento de medición, por el operador y/o por la variabilidad natural atribuible a las características mecánicas de los dos tipos de probetas en estudio. Este argumento indica que la variabilidad natural de los parámetros medidos en la madera sólida de *F. crenata*, disminuye al ser trasformada en multimaterial.

Los valores medios del módulo dinámico de la madera sólida de *F. crenata* y del multimaterial se posicionan cerca de la

tendencia que indica la correlación densidad-módulo dinámico (Figura 5) calculada a partir de los datos de [84]. Asimismo, los módulos dinámicos se sitúan por encima del promedio para maderas mexicanas y son del mismo orden que los reportados por [70] para especies con densidades mayores a las de *F. crenata* y del multimaterial: *Afzelia* sp ($\rho_{CH} = 754 \text{ kg m}^{-3}$, $E_{vt} = 12500 \text{ MN m}^{-2}$), *Intsia* sp ($\rho_{CH} = 834 \text{ kg m}^{-3}$, $E_{vt} = 17500 \text{ MN m}^{-2}$), *Astronium* sp ($\rho_{CH} = 817 \text{ kg m}^{-3}$, $E_{vt} = 16400 \text{ MN m}^{-2}$) y *Millettia* sp ($\rho_{CH} = 835 \text{ kg m}^{-3}$, $E_{vt} = 15800 \text{ MN m}^{-2}$).

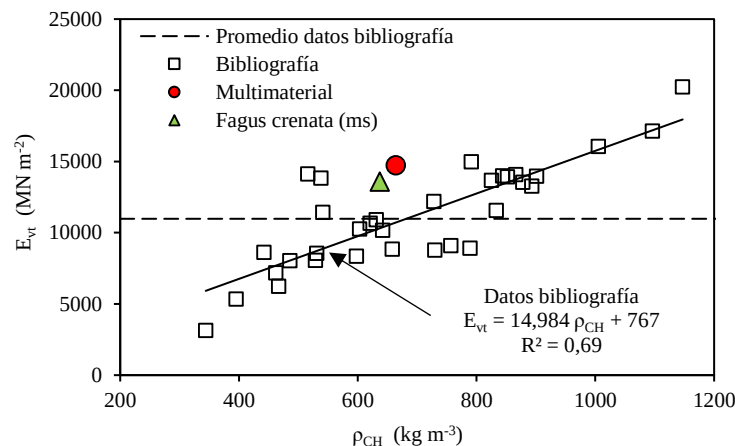


Figura 5. Correlaciones del módulo dinámico (E_{vt}) en función de la densidad (ρ_{CH}) de datos de la bibliografía. Se indican también los valores promedio de la madera sólida (*Fagus crenata* ms) y del multimaterial de la presente investigación.

Para asegurar la integridad estructural de la madera y en consecuencia su funcionamiento como elemento resistente, la industria de la construcción requiere que las especies con potencial para su incorporación en el proceso constructivo estén caracterizadas mecánicamente [88]. La determinación del módulo de elasticidad, determinado por métodos no destructivos, proporciona al ingeniero y/o constructor con madera uno de los parámetros necesarios al cálculo estructural. El módulo de elasticidad derivado de pruebas de vibraciones transversales produce información que puede ser utilizada como índice comparativo de la calidad de una especie en particular y como parámetro de

ingeniería necesario al análisis estructural probabilístico y sísmico [89-90].

3.5. Índices materiales

Para los índices materiales la prueba de comparación de medias indica que no hay diferencia significativa ($P_{(\alpha=0,05)} = 0,131$) entre los índices materiales de *F. crenata* y los del multimaterial (Tabla 3). Sin embargo, la magnitud del índice material del multimaterial aumenta 4,0% respecto a la de la madera sólida. Este parámetro se calcula con la Ecuación (3) de tal forma que, si el módulo dinámico y la densidad se incrementan en el multimaterial, su índice material lo hace proporcionalmente. De

manera análoga a la densidad, frecuencia y módulo dinámico, el coeficiente de variación disminuye -59,0% por el efecto de transformar la madera sólida en un multimaterial madera-malla-adhesivo.

Los valores medios del índice material de la madera sólida de *F. crenata* y del multimaterial se posicionan en la nube (Figura 6) formada por los datos de [84]. Las magnitudes del índice material de la madera sólida y del multimaterial son mayores a los

reportados por [84] para maderas mexicanas con densidad similar a la de *F. crenata*: *Tabebuia rosea* $I_{vt} = 17,2 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$, *Fraxinus americana* $I_{vt} = 17,3 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ y *Fagus mexicana* $I_{vt} = 15,9 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ (Tabla 1). Además, los resultados para *F. crenata* y el multimaterial madera-malla-adhesivo (Tabla 3) son del mismo orden que los reportados como módulo específico por [70] para *Afzelia* sp ($I_{vt} = 16,6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$), *Intsia* sp ($I_{vt} = 21,0 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$), *Astronium* sp ($I_{vt} = 20,1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$) y *Millettia* sp ($I_{vt} = 18,9 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$).

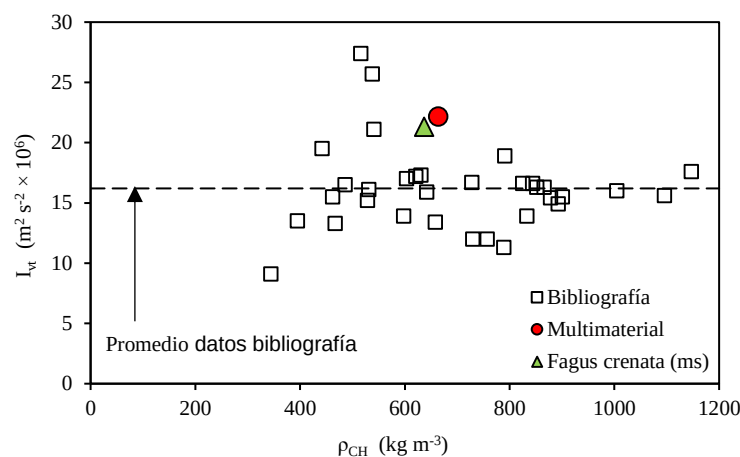


Figura 6. Dispersión del índice material (I_{vt}) en función de la densidad (ρ_{CH}) de datos de la bibliografía. Se indican también los valores promedio de la madera sólida (*Fagus crenata* ms) y del multimaterial de la presente investigación.

En la industria de la construcción, la madera sólida funciona como elemento estructural con el objetivo técnico de minimizar peso y optimizar las propiedades de resistencia. El índice material de la madera interpreta su capacidad elástica ponderada por su densidad. Una de las aplicaciones básicas de este indicador es como referencia para la selección de materiales en el proceso de diseño.

Considerando que el índice material es particular a cada especie, el multimaterial formado por madera de *F. crenata*, malla galvanizada y adhesivo a base de poliuretano muestra un alto valor comparativo con la madera sólida de otras especies. De tal forma, que exhibe un potencial de calidad para su

empleo en construcción y arquitectura con madera. Por ejemplo, el índice material de la madera, derivado de pruebas dinámicas, es útil en el cálculo estructural de componentes cuya función es de aislamiento acústico o disipación de energía, y en el diseño de estructuras expuestas a eventos excepcionales como son los sismos.

Así, para componentes constructivos con restricciones de dimensiones específicas y sometidos a movimientos, o situaciones donde es necesario maximizar la disipación de energía, un alto índice material ofrece ventajas comparativas frente a otro material para su funcionamiento en pisos, muros y techos, y en componentes como las vigas, viguetas y columnas, así como en tableros y/o

placas para revestimiento donde es necesario maximizar la rigidez, pero minimizar la transmisión de sonido y la masa.

De tal forma, el multimaterial madera-malla-adhesivo se posiciona en la tendencia del desarrollo de materiales ecológicos y sustentables derivados y/o compuestos de madera con aplicaciones futuras para materiales de electrónica verde, dispositivos biológicos para aplicaciones energéticas y de almacenamiento, así como de transmisión de información [12, 17, 14, 91-95].

En el mismo contexto, el multimaterial se contrasta favorablemente respecto a la madera sólida de *F. crenata*, maderas angiospermas y gimnospermas, compuestos comerciales y compuestos experimentales reportados por [73] como se observa en la Figura 7. En esta figura, los módulos elásticos de las maderas angiospermas y gimnospermas, así como los materiales compuestos, tanto comerciales como de los autores citados, son determinados en condiciones estáticas. En cambio, los módulos dinámicos de la madera sólida de *F. crenata* y del material son determinados por vibraciones transversales.

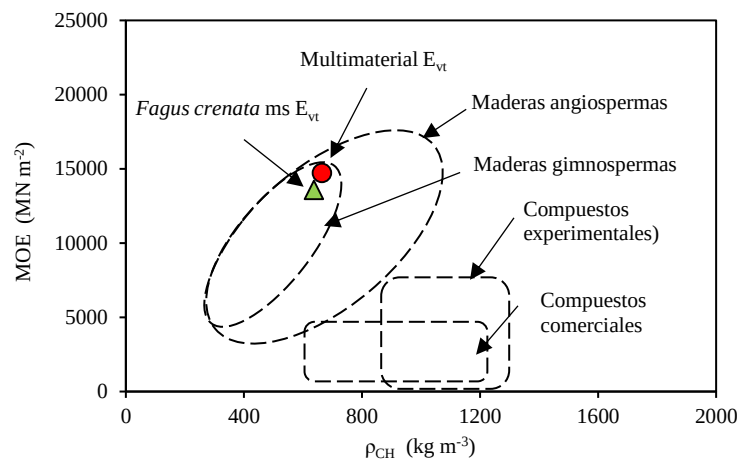


Figura 7. Posicionamiento del multimaterial madera-malla-adhesivo respecto a la madera sólida (ms) de *F. crenata*, maderas angiospermas y gimnospermas, compuestos comerciales y compuestos experimentales. Fuente: elaboración propia y datos de [73].

El empleo de índices materiales que son particulares a componentes trabajando en compresión y flexión puede servir para identificar especies de madera empleadas en proyectos de construcción que, de otro modo, no cumplirían los criterios mínimos para un análisis estructural. Este enfoque sirve para situar en su justa dimensión el empleo para una función, objetivo y restricciones específicas de la especie *F. crenata* y, en el caso de esta investigación, del multimaterial. Así, la selección de una especie de madera empleando índices materiales como criterio de preferencia puede ser útil para especificar los valores mínimos admisibles para el

análisis estructural, así como utilizarse para reglamentos de edificación con madera [96].

La aplicación del multimaterial se amplía hacia la ingeniería, la arquitectura y las ciencias de materiales, como un material flexible en sus características termo-físicas, mecano-acústicas y medio-ambientales [47]. De esta manera, el desarrollo de multimateriales puede contribuir al reciclaje de madera y subproductos de la transformación primaria de árboles, a la valoración de especies con baja apreciación tecnológica para usos estructurales y al

aprovechamiento de biomasa forestal como arbustos y matorrales [54-55].

4. Conclusiones

Las pruebas de vibraciones transversales son eficientes para determinar el módulo dinámico en probetas de pequeñas dimensiones de *F. crenata* y del multimaterial madera-malla-adhesivo. El tamaño de la muestra de 36 probetas es suficiente para determinar el módulo dinámico. Las magnitudes de la densidad, del módulo dinámico y del índice material son similares a los reportados en la bibliografía para maderas con densidades semejantes. La densidad no es un buen predictor del módulo dinámico; en cambio, la frecuencia sí lo es.

La transformación de madera sólida en un multimaterial madera-malla-adhesivo incrementa su módulo dinámico y su índice material. Además, disminuye la variabilidad natural de la madera de *F. crenata*. Asimismo, la densidad del multimaterial aumenta respecto a la de la madera sólida.

La prospectiva de los resultados permite proponer la utilización del multimaterial en elementos estructurales de diferentes formas, secciones y longitudes. Sus posibles usos industriales son:

- La industria de la Arquitectura,
- La industria de la construcción,
- La industria de la restauración de bienes inmuebles,
- La industria de muebles y utensilios,
- La industria de diseño y productos de madera,
- La industria automotriz y naval,
- La industria del embalaje y transporte.

La madera puede ser sustituida por otra especie y/o por una clase de compuestos de madera tales como tableros de partículas, de fibras y de astillas. Su orientación y acomodo pueden ser modificados para mejorar sus

propiedades de anisotropía a conveniencia. Adicionalmente, se puede aumentar el número de piezas de madera y mallas y conformar un material multicapas. La madera como componente del multimaterial puede a su vez ser modificada con procesos de impregnación, densificado y plastificado para mejorar su resistencia al biodeterioro, al fuego, así como para disminuir su higroscopía, heterogeneidad y variabilidad natural.

5. Agradecimientos

La investigación estuvo patrocinada por la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México. La madera de *Fagús crenata* fue donada por el Instituto de Tecnología de la Madera de la Universidad Prefectoral de Akita, Japón.

6. Referencias

- [1] Richter, C. (2015). *Wood Characteristics. Description, Causes, Prevention, Impact on Use and Technological Adaptation*. Heidelberg: Springer.
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-07422-1>
- [2] Ramage, M. H., Burrige, H., Busse-Wicher, M., Fereday, G., Reynolds, T., Shah, D. U. (...) y Scherman, O. (2017). The wood from the trees: The use of timber in construction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 333-359.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.107>
- [3] Jacob, M., Harrington, J., y Robinson, B. (2018). *The Structural Use of Timber Handbook for Eurocode 5: Part 1-1*. Dublin: COFORD. Recuperado de <http://www.coford.ie/media/coford/content/publications/TimberHandbook5Part130418.pdf>

- [4] American Institute of Timber Construction. (2012). *Timber Construction Manual*. Hoboken: John Wiley & Sons.
- [5] Borgström, E. (Ed.). (2016a). *Design of timber structures. Structural aspects of timber construction. Volumen 1*. Stockholm: Swedish Forest Industries Federation. Recuperado de <https://www.swedishwood.com/siteassets/5-publikationer/pdfer/design-of-timber-structures-1-2016.pdf>
- [6] Borgström, E. (Ed.). (2016b). *Design of timber structures. Rules and formulas according to Eurocode 5 (Volume 2)*. Stockholm: Swedish Forest Industries Federation. Recuperado de <https://www.swedishwood.com/siteassets/5-publikationer/pdfer/design-of-timber-structures-2-2016.pdf>
- [7] Borgström, E. (Ed.). (2016c). *Design of timber structures. Examples. (Volume 3)*. Stockholm: Swedish Forest Industries Federation. Recuperado de <https://www.swedishwood.com/siteassets/5-publikationer/pdfer/design-of-timber-structures-3-2016.pdf>
- [8] Sotomayor Castellanos, J. R., y Correa Jurado, S. (2016). Retención de sales de boro en la madera y su efecto en el módulo de elasticidad dinámico. *Revista Científica*. 24(1): 1-19. <https://doi.org/10.14483/10.14483/udistrital.jour.RC.2016.24.a9>
- [9] Fink, G., Honfi, D., Kohler, J., y Dietsch, P. (Eds.). (2018). *Basis of Design Principles for Timber Structures. A state-of-the-art report by COST Action FP1402 / WG 1*. Germany: Shaker Verlag Aachen. Recuperado de <https://www.cost.eu/wp-content/uploads/2018/11/Basis-of-Design-Principles-for-Timber-Structures.pdf>
- [10] Sandberg, D., Haller, P., y Navi, P. (2013). Thermo-hydro and thermo-hydro-mechanical wood processing: An opportunity for future environmentally friendly wood products, *Wood Material Science & Engineering*, 8(1), 64-88. <http://dx.doi.org/10.1080/17480272.2012.751935>
- [11] Ormondroyd, G. A., Spear, M., y Curling, S. F. (2015). Modified wood: Review of efficacy and service life testing. *Constructions Materials, Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, Paper 1400072. <http://dx.doi.org/10.1680/coma.14.00072>
- [12] Song, J., Chen, C., Wang, C., Kuang, Y., Li, Y., Jiang, F., (...) y Hu, L. (2017). Super flexible Wood. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 9(28), 23520-23527. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b06529>
- [13] Hill, C. A. S. (2006). *Wood Modification, Chemical, Thermal and Other Processes*. West Sussex: John Wiley & Sons.
- [14] Sandberg, D., Kutnar, A., y Mantanis, G. (2017). Wood modification technologies - a review. *iForest*, 10, 895-908. <http://dx.doi.org/10.3832/ifor2380-010>
- [15] Niederwestberg, J., Zhou, J., y Chui, Y.H. (2018). Mechanical Properties of Innovative, Multi-Layer Composite Laminated Panels. *Buildings*, 8, 142. <https://doi.org/10.3390/buildings8100142>
- [16] Jorda, J., Kain, G., Barbu, M. C., Haupt, M., y Krišt'ák, L. (2020). Investigation of 3D-Moldability of Flax Fiber Reinforced Beech Plywood. *Polymers*, 12, 2852. <https://doi.org/10.3390/polym12122852>
- [17] Icimoto, F. H., Calil Neto, C., Ferro, F. S., Borges de Macedo, L., Christoforo, A. L., Lahr, F. A. R., y Calil Júnior, C. (2016). Influence of Lamellar Thickness on Strength

and Stiffness of Glued Laminated Timber Beams of *Pinus oocarpa*. *International Journal of Materials Engineering*, 6(2), 51-55.

<https://doi.org/10.5923/j.ijme.20160602.05>

[18] Corigliano, P., Crupi, V., Epasto, G., Guglielmino, E., Maugeri, N., y Marin, A. (2017). Experimental and theoretical analyses of Iroko wood laminates. *Composites Part B*, 112, 251-264.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.12.049>

[19] Merk, V., Chanana, M., Gierlinger, N., Hirt, A. M., y Burgert, I. (2014). Hybrid Wood Materials with Magnetic Anisotropy Dictated by the Hierarchical Cell Structure. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 6, 9760-9767.
<http://dx.doi.org/10.1021/am5021793>

[20] Marzi, T. (2015). Nanostructured materials for protection and reinforcement of timber structures: A review and future challenges. *Construction and Building Materials*, 97, 119-130.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.016>

[21] Wei, J., Rao, F., Zhang, Y., Yu, W., Hse, C., y Shupe, T. (2019). Laminating wood fiber mats into a densified material with high performance. *Materials Letters*, 253, 358-361.
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.06.097>

[22] Raftery, G. M., y Rodd, P. D. (2015). FRP reinforcement of low-grade glulam timber bonded with wood adhesive. *Construction and Building Materials*, 91, 116-125.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.026>

[23] Borri, A., Corradi, M., y Grazini, A. (2005). A method for flexural reinforcement

of old wood beams with CFRP materials. *Composites: Part B*, 36, 143-153.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2004.04.013>

[24] Corradi, M., Righetti, L., y Borri, A. (2015). Bond Strength of Composite CFRP Reinforcing Bars in Timber. *Materials*, 8, 4034-4049.
<http://dx.doi.org/10.3390/ma8074034>

[25] Reis, J. P., De Moura, M. F. S. F., Silva, F. G. A., y Dourado, N. (2018). Dimensional optimization of carbon-epoxy bars for reinforcement of wood beams. *Composites Part B*, 139, 163-170.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.11.046>

[26] Byeon, J. W., Cho, Y. J., Lee, J. R., y Park, H. M. (2016). Static Bending Strength Performance of Domestic Wood-Concrete Hybrid Laminated Materials. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, 44(1), 48-56.
<http://dx.doi.org/10.5658/WOOD.2016.44.1.48>

[27] De Lima, A. J. M., Iwakiri, S., y Trianoski, R. (2020). Determination of the physical and mechanical properties of wood-cement boards produced with *Pinus* spp and pozzolans waste. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 22(4), 527-536.
<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2020005000411>

[28] Clauß, S., Gabriel, J., Karbach, A., Matner, M., y Niemz, P. (2011). Influence of the adhesive formulation on the mechanical properties and bonding performance of polyurethane prepolymers. *Holzforschung*, 65, 835-844.
<http://dx.doi.org/10.1515/HF.2011.095>

[29] Gáborik, J., Gaff, M., Ruman, D., Záborský, V., Kašíčková, V., y Sikora, A.

(2016). Adhesive as a factor affecting the properties of laminated Wood. *BioResources*, 11(4), 10565-10574. <http://dx.doi.org/10.15376/biores.11.4.10565-10574>

[30] Jasieńko, J., y Nowak, T. P. (2014). Solid timber beams strengthened with steel plates – Experimental studies. *Construction and Building Materials*, 63, 81-88. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.020>

[31] Cañola, H. D., Echavarría, C., y Echavarría, B. (2018). Glulam beams reinforced with punched metal plates. *DYNA*, 85(204), 127-133. <http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v85n204.67847>

[32] Jorge, F. C., Pereira, C., y Ferreira, J. M. F. (2004). Wood-cement composites: a review. *Holz Roh Werkst*, 62, 370-377. <http://dx.doi.org/10.1007/s00107-004-0501-2>

[33] Na, B., Wang, Z., Wang, H., y Lu, X. (2014). Wood-cement compatibility review. *Wood Research*, 59(5), 813-626. <http://www.woodresearch.sk/wr/201405/10.pdf>

[34] Saba, N., Jawaid, M., Alothman, O. Y., y Paridah. M. T. (2016). A review on dynamic mechanical properties of natural fibre reinforced polymer composites. *Construction and Building Materials*, 106, 149-159. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.075>

[35] Qi, Y., Xiong, W., Liu, W., Fang, H., y 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.

<http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0140893>

[36] Nadir, Y., Nagarajan, P., Ameen, M., y 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.133>

[37] Kusnindar., Dewi, S. M., Soehardjono, A., y 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>

[38] Stoeckel, F., Konnerth, J., y Gindl-Altmutter, W. (2013). Mechanical properties of adhesives for bonding wood - A review. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 45, 32-41. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2013.03.013>

[39] Campilho, R. D. S. G., De Moura, M. F. S. F., Barreto, A. M. J. P., Morais, J. J. L., y 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, 531-537. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.006>

[40] Dietsch, P., y 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.028>

- [41] Steiger, R., Serrano, E., Stepinac, M., Rajčić, V., O'Neill, C., McPolin, D., y 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>
- [42] Rangavar, H. (2017). Wood-Cement Board Reinforced with Steel Nets and Woven Hemp Yarns: Physical and Mechanical Properties. *Drvna Industrija*, 68(2), 121-128. <http://dx.doi.org/10.5552/drind.2017.1631>
- [43] Toğay, A., Döngel, N., Söğütü, C., Ergin, E., Uzel, M., y Güneş, S. (2017). Determination of the Modulus of Elasticity of Wooden Construction Elements Reinforced with Fiberglass Wire Mesh and Aluminum Wire Mesh. *Bioresources*, 12(2), 2466-2478. <http://dx.doi.org/10.15376/BIORES.12.2.2466-2478>
- [44] Karampour, H., Bismire, A., Bourges, M., Bailleres, H., Gilbert, B. P., Gunalan, S., (...) y Guan, H. (2018). Experimental investigation on the structural performance of timber-filled tubular steel stub columns. *2018 World Conference on Timber Engineering*, Seoul, Republic of Korea. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/327838307_experimental_investigation_on_the_structural_performance_of_timber-filled_tubular_steel_stub
- [45] Qiao, Q., Yang, Z., y 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>
- [46] Milner, H. R. (2009). Sustainability of engineered wood products in construction. En J. M. Khatib (Ed.). *Sustainability of Construction Materials* (pp. 184-212). Cambridge: Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. <https://doi.org/10.1533/9781845695842.184>
- [47] Asdrubali, F., Ferracuti, B., Lombardi, L., Guattari, C., Evangelisti, L., y 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.12.033>
- [48] Caruso, M. C., Menna, C., Asprone, D., Prota, A., y Manfredi, G. (2017). Methodology for Life-Cycle Sustainability Assessment of Building Structures. *ACI Structural Journal*, 114(2), 323-336. <http://dx.doi.org/10.14359/51689426>
- [49] Li, R., Natsuki, T., y Ni, Q. Q. (2015). A novel dynamic stress analysis in bimaterial composite with defect using ultrasonic wave propagation. *Composite Structures*, 132, 255-264. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.04.046>
- [50] Kohl, D., Link, P., y Böhm, S. (2016). Wood as a Technical Material for Structural Vehicle Components. *Procedia CIRP*, 40, 557-561. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.133>
- [51] Kohl, D., Long, T. H. N., y 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>
- [52] Kohl, D., Von Boyneburgk, C., Feldmann, M., Heim, H. P., y Böhm, S. (2018). Characterization of wood-based multi-material systems under dynamic impact

stress. *Wood Material Science & Engineering*, 15(3), 130-139. <https://doi.org/10.1080/17480272.2018.1501605>

[53] Żmijewski, T., y Wojtowicz-Jankowska, D. (2017). Timber - Material of the Future - Examples of Small Wooden Architectural Structures. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 245(8), 082019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/245/8/082019>

[54] Papadopoulos, A. N. (2020a). Advances in Wood Composites. *Polymers*, 12, 1-8. <https://doi.org/10.3390/polym12010048>

[55] Papadopoulos, A. N. (2020b). Advances in Wood Composites II. *Polymers*, 20, 1-4. <https://doi.org/10.3390/polym12071552>

[56] American National Standards Institute [ANSI]. (2018). ANSI 405-2018: *Standard for Adhesives for Use in Structural Glued Laminated Timber*. Washington: American National Standards Institute.

[57] American National Standards Institute [ANSI]. (2020). ANSI 117-2020: *Standard Specification for Structural Glued Laminated Timber of Softwood Species*. Washington: American National Standards Institute.

[58] International Organization for Standardization [ISO]. (2014a). 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*. Geneva: International Organization for Standardization.

[59] International Organization for Standardization [ISO]. (2014b). 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:

International Organization for Standardization.

[60] International Organization for Standardization [ISO]. (2020). ISO 16978:2003. *Wood-based panels. Determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength*. Geneva: International Organization for Standardization.

[61] Kielmann, B. C., Militz, H., y Mai, C. (2013). Strength Changes in Ash, Beech and Maple Wood Modified with a N-Methylol Melamine Compound and a Metal-Complex Dye. *Wood Research*, 58(3), 343-350. Recuperado de <http://www.woodresearch.sk/wr/201303/02.pdf>

[62] Faydi, Y., Brancheriau, L., Pot, G., y Collet, R. (2017). Prediction of Oak Wood Mechanical Properties Based on the Statistical Exploitation of Vibrational Response. *BioResources*, 12(3), 5913-5927. <https://doi.org/10.15376/biores.12.3.5913-5927>

[63] Bardak, T. (2019). Effects of Different Advanced Engineering on Deformation Behaviour of Wood Structural Materials. *Bioresources*, 14(1), 180-192. <http://dx.doi.org/10.15376/biores.14.1.180-192>

[64] Wang, B., Bachtar, E. V., Yan, L., Kasal, B., y Fiore, V. (2019). Flax, Basalt, E-Glass FRP and Their Hybrid FRP Strengthened Wood Beams: An Experimental Study. *Polymers*, 11(8), 1255-1270. <http://dx.doi.org/10.3390/polym11081255>

[65] Guan, C., Zhang, H., Hunt, J. F., Zhou, L., y Feng, D. (2016). Measurement of Dynamic Viscoelasticity of Full-Zise Wood Composites Panels Using a Vibration Testing Method. *BioResources*, 11(2), 4593-4604.

Recuperado de
https://bioresources.cnr.ncsu.edu/BioRes_11/BioRes_11_2_4593_Guan_ZHZF_Meas_Dynamic_Viscoelasticity_Wood_Comp_Vibration_Method_9199.pdf

[66] Dackermann, U., Elsener, R., Li, J., y Crews, K. (2016). A comparative study of using static and ultrasonic material testing methods to determine the anisotropic material properties of wood. *Construction and Building Materials*, 102, 963-976. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.195>

[67] De Cicco, D., y Taheri, F. (2018). Use of a Simple Non-Destructive Technique for Evaluation of the Elastic and Vibration Properties of Fiber-Reinforced and 3D Fiber-Metal Laminate Composites. *Fibers*, 6(1), 14-37. <http://dx.doi.org/10.3390/fib6010014>

[68] Alfredsen, G., y Larnøy, E. (2006). Dynamic MOE testing of wood: the influence of wood protecting agents and moisture content on ultrasonic pulse and resonant vibration. *Wood Research*, 51(1), 11-20. Recuperado de <http://www.woodresearch.sk/wr/200601/02.pdf>

[69] Ghosh, S. C., Miltz, H., y Mai, C. (2008). Decay resistance of treated wood with functionalized commercial silicones. *BioResources*, 3(4), 1303-1314. Recuperado de https://bioresources.cnr.ncsu.edu/BioRes_03/BioRes_03_4_1303_Ghosh_MM_Decay_Resis_Treated_Wood_Silicones_313.pdf

[70] Baar, J., Tippner, J., y Gryc, V. (2016). Wood anatomy and acoustic properties of selected tropical hardwoods. *IAWA Journal*, 37(1), 69-83. <https://doi.org/10.1163/22941932-20160121>

[71] Ashby, M. F. (2011). *Materials selection in mechanical design*. London: Butterworth-Heinemann.

[72] Král, P., Klímek, P., Mishra, P. K., Wimmer, R., y Děcký, D. (2015). Specific modulus and density profile as characterization criteria of prefabricated wood composite materials. *Acta Universitatis Agriculturae Et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 63(2), 433-438. <http://dx.doi.org/10.11118/actaun201563020433>

[73] Dias, B. Z., y De Alvarez, C. E. (2017). Mechanical properties: wood lumber versus plastic lumber and thermoplastic composites. *Ambiente Construído*, 17(2), 201-219. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212017000200153>

[74] Konopka, D., Gebhardt, C., y Kaliske, M. (2017). Numerical modelling of wooden structures. *Journal of Cultural Heritage*, 27S, S93-S102. <http://dx.doi.org/10.1016/j.culher.2015.09.008>

[75] Darzi, S., Karampoura, H., Gilbert, B. P., y Bailleres, H. (2018). Numerical study on the flexural capacity of ultra-light composite timber sandwich panels. *Composites Part B: Engineering*, 155, 212-224. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.08.022>

[76] Singh, N., Rana, A., y Badhotiya, G. K. (2021). Manufacturing processes for the development of engineered wood – A mini-review. *Materials Today: Proceedings*, 1-4. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.612>

[77] Song, J., Chen, C., Zhu, S., Zhu, M., Dai, J., Ray, U., (...) y Hu, L. (2018). Processing bulk natural wood into a high-performance structural material. *Nature*, 554, 224-239. <https://doi.org/10.1038/nature25476>

- [78] Naruse, K. (2003). Estimation of shear moduli of wood by quasi-simple shear tests. *Journal of Wood Science*, 49(6), 479-484. <http://dx.doi.org/10.1007/s10086-003-0515-0>
- [79] Sotomayor Castellanos, J. R., Macedo Alquicira, I., y Chávez García, H. L. (2020). Variabilidad en las densidades, las velocidades del ultrasonido y los módulos dinámicos en tres maderas mexicanas y tres maderas japonesas. *Ingeniería y Desarrollo*, 38(2), 282-299. <https://doi.org/10.14482/inde.38.2.624.15>
- [80] Macedo Alquicira, I., Sotomayor Castellanos, J. R., y Castro Sánchez, F. J. (2019). Laminated wood and multimaterial wood – adhesive meshas replacements of solid wood in restoration of historical buildings, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W15, 711-718. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-711-2019>
- [81] Yelle D. J., y Stirgus, A. M. (2016). Influence of Anatomical, Physical, and Mechanical Properties of Diffuse-Porous Hardwoods on Moisture Durability of Bonded Assemblies. General Technical Report FPL-GTR-244. Madison: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. <https://doi.org/10.2737/FPL-GTR-244>
- [82] Pizzi, A., Papadopoulos, A. N., y Policardi, F. (2020). Wood Composites and Their Polymer Binders. *Polymers*, 12, 1115. <https://doi.org/10.3390/polym12051115>
- [83] Weaver, W. Jr., Timoshenko, S. y Young, D. H. (1990). *Vibration problems in engineering*. New York: Wiley.
- [84] Sotomayor Castellanos, J. R. (2019). 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*, 15(1), 3-64. Recuperado de 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
- [85] Gutiérrez Pulido, H. y De La Vara Salazar, R. (2012). *Análisis y diseño de experimentos*. México: Mc Graw Hill.
- [86] Jayne, B. A. (1959). Vibrational properties of wood as indices of quality. *Forest Products Journal*, 9(11), 413-416.
- [87] Hanhijärvi, A., Ranta-Maunus, A., y Turk, G. (2005). *Potential of strength grading of timber with combined measurement techniques. Report of the Combigrade-project, phase 1*. Espoo, Finland: VTT Publications 568.
- [88] Joint Committee on Structural Safety. (2006). *Probabilistic model code. Part 3.5-Timber*. Joint Committee on Structural Safety.
- [89] Dietsch, P. y Köhler, J. (2010). *Assessment of Timber Structures. Modelling of the Performance of Timber Structures*. European Science Foundation. Herzogenrath: Shaker Verlag.
- [90] Sousa, H. S., Sørensen J. D., Kirkegaard, P. H., Branco, J. M., y Lourenço, P. B. (2013). On the use of NDT data for reliability-based assessment of existing timber structures. *Engineering Structures*, 56, 298-311. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.05.014>
- [91] Kües, U. (Ed.). (2007). *Wood Production, Wood Technology, and Biotechnological Impacts*. Göttingen:

Universitätsverlag Göttingen.
<https://doi.org/10.17875/gup2007-262>

[92] Zhu, H., Luo, W., Ciesielski, P. N. Fang, Z., Zhu, J. Y., Henriksson, G., (...) y Hu, L. (2016). Wood-Derived Materials for Green Electronics, Biological Devices, and Energy Applications. *Chemical Reviews*, 116, 9305-9374.

<https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00225>

[93] Mitchell G., Gaspar F., Mateus A., Mahendra V., y Sousa D. (2018). Advanced Materials from Forests. En L. Martínez, O. Kharissova, B. Kharisov (Eds). *Handbook of Ecomaterials*. Cham: Springer.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-48281-1_189-1

[94] Sun, W., Shen, H., y Cao, J. (2016). Modification of wood by glutaraldehyde and poly (vinyl alcohol). *Materials and Design*, 96, 392-400.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2016.02.044>

[95] Labans, E., Kalnins, K., y Bisagni, C. (2019). Flexural behavior of sandwich panels with cellular wood, plywood stiffener/foam and thermoplastic composite core. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 21(2), 784-805.
<https://doi.org/10.1177/1099636217699587>

[96] Sotomayor Castellanos, J. R. (2018). Índices materiales en flexión estática de maderas mexicanas con potencial para uso en la construcción. *Ingeniería Mecánica. Tecnología y Desarrollo*, 6(2), 45-52. Recuperado de <http://www.revistas-conacyt.unam.mx/revistasomim/index.php/MTyD/article/view/131/85>