



DENSIDAD Y MÓDULOS DINÁMICOS POR VIBRACIONES TRANSVERSALES DE MADERA SÓLIDA Y LAMINADA DE TRES ESPECIES TROPICALES

Javier Ramón Sotomayor Castellanos

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

E-mail: madera999@yahoo.com

RESUMEN

La presente investigación tuvo dos objetivos: 1) determinar la densidad y el módulo dinámico de madera sólida y laminada de las especies *Enterolobium cyclocarpum*, *Tabebuia rosea* y *Juglans pyriformis*, y 2) comparar las magnitudes de estos parámetros entre las tres especies. Se prepararon probetas normalizadas en donde se determinó la densidad aparente y el contenido de humedad. Se realizaron pruebas de vibraciones transversales para calcular las frecuencias naturales y los módulos dinámicos. Las tres especies se diferenciaron respecto a los resultados de la densidad y del módulo dinámico, esto en cuanto a la madera laminada frente a la madera sólida. La densidad de la madera laminada aumenta, en comparación con la de la madera sólida. En cambio, el módulo dinámico de la madera laminada disminuye para las tres especies, en equiparación con el de la madera sólida. La densidad de la madera sólida explica el 69% de la densidad de la madera laminada. El módulo dinámico de la madera sólida explica el 50% de la predicción correspondiente al módulo dinámico de la madera laminada.

PALABRAS CLAVES

Madera sólida, madera laminada, *Enterolobium cyclocarpum*, *Tabebuia rosea*, *Juglans pyriformis*.

DENSITY AND DYNAMIC MODULES BY TRANSVERSAL VIBRATIONS OF SOLID AND LAMINATED WOOD OF THREE TROPICAL SPECIES

ABSTRACT

The objectives of the research were two: 1) to determine the density and dynamic modulus of solid and laminated wood of *Enterolobium cyclocarpum*, *Tabebuia rosea* and *Juglans pyriformis*, and 2) to compare the magnitudes of these parameters, among the three species. Standard specimens were prepared and their apparent density and moisture content were determined. Transverse vibration tests were performed to calculate natural frequencies and dynamic modulus. The three species were differentiated on the results of density and dynamic modulus, for laminated wood in front of solid wood. The density of laminated wood increases, compared to the solid wood. The dynamic modulus of laminated wood, compared to the solid wood, decreases for all three species. The density of solid wood accounts for 69% of the density of laminated wood. The dynamic modulus of solid wood explains 50% of the prediction corresponding to the dynamic modulus of the laminated wood.

KEYWORDS

Solid wood, laminated wood, *Enterolobium cyclocarpum*, *Tabebuia rosea*, *Juglans pyriformis*.

INTRODUCCIÓN

La madera laminada es una tecnología desarrollada para disminuir la heterogeneidad material y la variabilidad natural de las características estructurales de la madera sólida (Alméras *et al.*, 2005). Conjuntamente, esta técnica pretende aumentar el aprovechamiento en volumen de piezas de madera con pequeñas dimensiones, al reconstituirlas en elementos estructurales con las dimensiones de uso en ingeniería de la madera (Bourreau *et al.*, 2013). En este contexto, se pretende que las características de resistencia mecánica de la madera laminada conserven, por lo menos, la misma magnitud de las características originales de la especie de madera sólida con las cuales fueron fabricadas (Tenorio *et al.*, 2011). Respecto a lo anterior, la información reportada en la bibliografía es contradictoria.

Investigaciones realizadas con maderas laminadas fabricadas en dimensiones para su empleo como componentes estructurales en la industria de la construcción (Ribeiro et al., 2009; Hayashi & Miyatake, 2015), reportan que el módulo de elasticidad de vigas laminadas incrementa su valor con respecto al de la madera sólida, tratándose de la misma especie. No obstante, Erdil *et al.* (2009), y Nadir & Nagarajan (2014), reportan resultados diferentes. Sus investigaciones concluyen que el módulo de elasticidad no necesariamente es equivalente o mayor entre la madera sólida y la madera laminada.

Esta incompatibilidad en los resultados de investigaciones orientadas a verificar si el valor del módulo de elasticidad mejora, o al menos se mantiene al fabricar madera laminada, está también reportada para experimentos con probetas de pequeñas dimensiones (Araujo *et al.* (2005); Komariah *et al.*, 2009). Por otra parte, Araujo *et al.* (2005), y Bal & Bektaş (2012), proponen que los resultados derivados de experimentos con pequeñas probetas de madera laminada pueden ser útiles para la caracterización y promoción de especies de madera con una escala de baja apreciación comercial. Aun así, los resultados de los trabajos citados no garantizan, necesariamente para una misma especie, el incremento en el módulo de elasticidad de la madera laminada respecto al de la madera sólida. Respecto a la densidad de la madera laminada, la literatura reporta un aumento con respecto a la densidad correspondiente de la madera sólida, ambos tipos de la misma especie (Erdil *et al.*, 2009; Keskin, 2009).

En ese sentido, la densidad de la madera se puede determinar, entre otros procedimientos, con la norma ISO 13061-2:2014 (*International Organization for Standardization*, 2014b). La densidad de la madera va siempre asociada a un contenido de humedad específico, el cual es calculado con ayuda de la norma ISO 13061-1:2014 (*International Organization for Standardization*, 2014a). De igual modo, el módulo de elasticidad de la madera puede ser evaluado con la norma ISO 13061-2:2014 (*International Organization for Standardization*, 2014c). Todos estos parámetros fueron utilizados en el caso de probetas con pequeñas dimensiones, correspondientes a las

dimensiones especificadas en la norma ISO 3129:2012 (*International Organization for Standardization*, 2012).

La caracterización mecánica de la madera empleando pruebas dinámicas muestra otro enfoque experimental, y es la tendencia contemporánea a utilizar métodos no destructivos (Pellerin & Ross, 2002). Por ejemplo, la técnica de vibraciones transversales ASTM D6874-12 (*American Society of Testing and Materials International*, 2014), ha demostrado su eficiencia en la determinación del módulo dinámico de la madera. Por su parte, el ultrasonido ha sido aplicado, entre otros autores, por Senalik *et al.* (2014); las ondas de esfuerzo se han utilizado por Dackermann *et al.* (2014); y las vibraciones transversales y longitudinales por Yoshihara (2012).

De los argumentos anteriores, se deriva la incertidumbre acerca del aumento del módulo dinámico de la madera laminada, y sugiere el estudio de casos particulares de madera laminada elaborada con especies diferenciadas. Para el caso de esta investigación, se emplearon piezas de madera laminada y sólida con pequeñas dimensiones de *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb., *Tabebuia rosea* (Bertol.) DC. y *Juglans pyriformis* Liebm. Estas especies son endémicas de México y Centroamérica (Cordero & Boshier, 2003). Su importancia ecológica está notificada en documentos publicados por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO, México), y por la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR, México). Sus características tecnológicas están referidas por Tamarit & López (2007), Silva *et al.* (2010), y Sotomayor (2015). Sin embargo, no se detectó información acerca de la densidad y del módulo dinámico determinado por vibraciones transversales en madera sólida y laminada de las especies referidas.

El primer objetivo de la investigación fue determinar la densidad y el módulo dinámico, este último por vibraciones transversales, de pequeñas probetas de madera sólida y laminada de *Enterolobium cyclocarpum*, *Tabebuia rosea* y *Juglans pyriformis*. El segundo objetivo fue comparar las magnitudes de la densidad y del módulo dinámico entre las tres especies en estudio, y entre la madera sólida y

laminada. El alcance de la investigación se limita a los resultados de las especies seleccionadas, así como para el estudio de caso de probetas con pequeñas dimensiones y ensayadas por medio de una prueba con carácter no destructivo, como son las vibraciones transversales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se recopiló madera aserrada de *Enterolobium cyclocarpum*, *Tabebuia rosea* y *Juglans pyriformis*. Así mismo, se prepararon probetas de madera sólida y laminada con dimensiones de 0,02 m x 0,02 m x 0,40 m, en las direcciones radial, tangencial y longitudinal de la madera, de acuerdo con la norma ISO 3129:2012 (*International Organization for Standardization*, 2012). Las probetas se almacenaron en una cámara de acondicionamiento con temperatura de 20°C ($\pm 1^\circ\text{C}$), y humedad relativa del aire de 20% ($\pm 2\%$), hasta que su peso fue constante. Así, la madera se estabilizó bajo un contenido de humedad promedio de 10% ($\pm 1\%$). La densidad de la madera se determinó con la relación entre el peso de la probeta y su volumen, ambas medidas realizadas al momento del ensayo (ISO 13061-2:2014, *International Organization for Standardization*, 2014b). El contenido de humedad de la madera fue calculado por el método de diferencias de peso de las probetas al momento del ensayo, en relación a su peso anhidro (ISO 13061-1:2014, *International Organization for Standardization*, 2014a).

Para la fabricación de las probetas de madera laminada, se utilizaron cinco tabletas de madera sólida de acuerdo a la estructura sugerida por Sotomayor *et al.* (2015). Para adherir las tabletas, se aplicaron 2,5 kg m⁻² de pegamento de contacto de acetato de vinilo. Una vez armadas las probetas, se posicionaron en un dispositivo *ad-hoc* y se prensaron hasta que las viguetas alcanzaron una altura o espesor uniforme de 0,02 m. Con el objetivo de que el adhesivo solidificara, el tiempo de prensado fue de 48 horas en ambiente de laboratorio (temperatura de 20°C y humedad relativa del aire de 65%). Finalmente, las probetas de madera laminada se almacenaron durante tres meses en la cámara de acondicionamiento, con las condiciones antes citadas de temperatura y

de humedad relativa del aire, hasta que su peso fue constante.

La densidad de la madera se calculó con la fórmula (1) (*International Organization for Standardization*, 2014b):

$$\rho_{CH} = \left(\frac{P}{V} \right) \quad (1)$$

Donde:

ρ_{CH} = Densidad de la madera (kg m^{-3})

P = Peso de la probeta (kg)

V = Volumen de la probeta (m^{-3})

El contenido de humedad de la madera se calculó con la fórmula (2) (*International Organization for Standardization*, 2014a):

$$CH = \left(\frac{P_1 - P_2}{P_2} \right) \times 100 \quad (2)$$

Donde:

CH = Contenido de humedad de la madera (%)

P_1 = Peso de la probeta en estado húmedo (kg)

P_2 = Peso de la probeta en estado seco (kg)

El módulo dinámico de la madera se determinó de acuerdo al procedimiento recomendado por la norma ASTM D6874-12 (*American Society of Testing and Materials International*, 2012), reportado por Villaseñor & Sotomayor (2015). Las pruebas consistieron en medir la frecuencia de resonancia, en el primer modo de vibración, de una probeta posicionada sobre apoyos de tipo libre-libre (Figura 1).

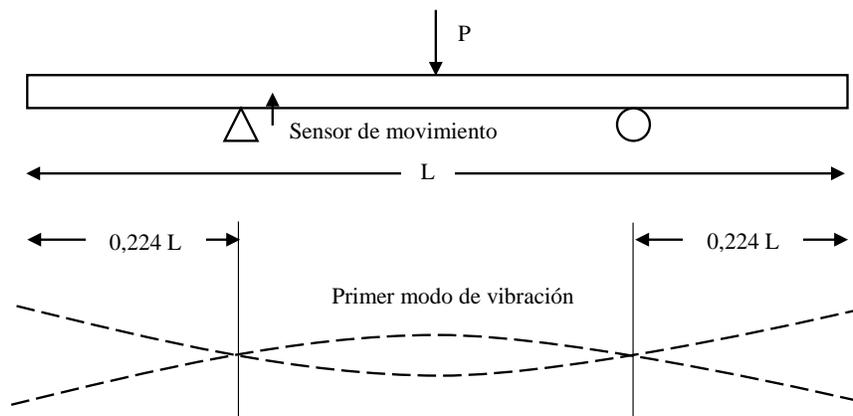


Fig. 1 Prueba de vibraciones transversales y diagrama del movimiento de la probeta. P = Impacto dinámico; L = Longitud de la probeta. Adaptada de Villaseñor & Sotomayor (2015)

El módulo dinámico se calculó con la fórmula (3) (Machek *et al.*, 2001):

$$E_{vt} = \frac{4 \pi^2 L^4 f_{vt}^2 \rho_{CH}}{m^4 r^2} \left(1 + \frac{r^2}{l^2} K \right) \quad (3)$$

Donde:

E_{vt} = Módulo dinámico ($N m^{-2}$)

L = Largo de la probeta (m)

l = Distancia entre apoyos (m)

f_{vt} = Frecuencia natural de vibración de la probeta (Hz)

ρ_{CH} = Densidad de la madera a un contenido de humedad CH ($kg m^{-3}$)

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

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

con: $r = \sqrt{I/A}$

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

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

Diseño experimental

Se compararon dos estados del material: madera sólida (S), y madera laminada (L); cada uno preparado únicamente con una de las tres especies en estudio: *Enterolobium cyclocarpum* (EC), *Tabebuia rosea* (TR) y *Juglans pyriformis* (JP). Para cada estado del material se consideraron variables de respuesta: la densidad (ρ_{CH} , fórmula 1), y el módulo dinámico (E_{vt} , fórmula 3). El contenido de humedad (CH, fórmula 2), se consideró parámetro de referencia. El estado del material y la especie se analizaron como factores de variación independientes entre sí. Los parámetros invariables fueron: el adhesivo utilizado en la fabricación de las probetas de madera laminada (poliuretano), la configuración de estas probetas (cinco elementos); las dimensiones (ancho, espesor y longitud), y el contenido de humedad (10%, ± 1 %).

Para obtener los resultados de cada una de las seis muestras, (dos estados por tres especies), con 35 réplicas, (probetas), para cada una de ellas, se calcularon su media (\bar{x}), su desviación estándar (σ), y para estimar el error introducido en la medición de cada parámetro, se calculó su coeficiente de variación ($CV = \sigma / \bar{x}$, en porciento). A continuación, se planearon tres experimentos:

Experimento 1. Para una misma especie se compararon cada uno de los dos parámetros del estado del material sólido, frente a los dos parámetros correspondientes al estado del material laminado. Con esta perspectiva, el estado del material se consideró el factor de variación y se fijó la especie; por ejemplo: ρ_{CH} EC S vs. ρ_{CH} EC L. El objetivo particular de este experimento fue identificar si variaba la densidad o el módulo dinámico de una especie de madera laminada en particular. Ello respecto a los resultados obtenidos con la madera sólida.

Experimento 2. Para un mismo estado del material (S o L), se compararon los parámetros ρ_{CH} y E_{vt} , para cada una de las tres diferentes especies (EC, TR y JP). Es decir, la especie fue considerada el factor de variación y se fijó el estado del material; por ejemplo: E_{vt} EC S vs. E_{vt} TR S. El objetivo particular de este experimento fue

distinguir la variación en la magnitud de la densidad o del módulo dinámico entre las especies estudiadas.

Experimento 3. Para los 105 resultados combinados de las tres especies, se calcularon las regresiones lineales ($y = ax \pm b$), y sus coeficientes de determinación (R^2). Dichos cálculos abarcaron las variables dependientes (ρ_{CH} y E_{vt}) del estado sólido (S), en función de las variables independientes (ρ_{CH} y E_{vt}) correspondientes al estado laminado (L); por ejemplo: $E_{vt} L = f(E_{vt} S)$. El objetivo particular de este experimento fue determinar la precisión del parámetro medido en la madera sólida, para explicar el parámetro correspondiente en la madera laminada.

Para lograr dicho objetivo se calcularon el sesgo estandarizado (SE) y la curtosis estandarizada (CE), para las variables ρ_{CH} y E_{vt} . Cuando las pruebas de normalidad y de verificación de varianzas (ver-var) fueron satisfactorias, se realizaron análisis de varianza (anova) de muestras independientes para un nivel del 95% de confianza. Por el contrario, se realizaron pruebas no paramétricas de *Kruskal-Wallis* (K-W) de diferencias de medianas (\bar{X}), para un nivel del 95% de confianza. El criterio de demarcación para las pruebas ver-var, anova y K-W, fue aceptar una diferencia estadísticamente significativa para un valor $P > 0,05$.

RESULTADOS

La Tabla 1 reúne los resultados de la densidad, del módulo de elasticidad y de sus variaciones para las maderas de *Enterolobium cyclocarpum*, *Tabebuia rosea* y *Juglans pyriformis*. Las magnitudes aquí obtenidas respecto de la densidad y del módulo dinámico para la madera sólida de estas especies, son similares a las reportadas en la bibliografía (Sotomayor, 2015).

La Tabla 2 muestra los resultados del experimento 1, en el cual se fijó la especie y se consideró el estado del material como el factor de variación. Las densidades de la madera laminada de *Enterolobium*

cyclocarpum y de *Juglans pyriformis* indicaron diferencias estadísticamente significativas ($P \leq 0,05$) con respecto a la densidad de la madera sólida. Caso contrario, la densidad de *Tabebuia rosea* no presentó una diferencia estadísticamente significativa ($P \geq 0,05$), con respecto a la densidad de la madera sólida de esta especie. Los módulos dinámicos de la madera laminada de *Enterolobium cyclocarpum*, *Tabebuia rosea* y *Juglans pyriformis* resultaron con diferencias estadísticamente significativas ($P \leq 0,05$), en cuanto a los módulos dinámicos de la madera sólida de sus respectivas especies.

Tabla 1. Resultados de la densidad, del módulo de elasticidad y de sus variaciones.

Especie		Madera sólida		Madera laminada		Variación	
		ρ_{CH} (kg m^{-3})	E_{vt} (MN m^{-2})	ρ_{CH} (kg m^{-3})	E_{vt} (MN m^{-2})	$\Delta\rho_{CH}$ (%)	ΔE_{vt} (%)
<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	\bar{x}	456	9472	501	8085	+10,0	-14,6
	σ	47	895	38	1011	-	-
	CV	10,4	9,4	7,7	12,5	-26,0	+32,4
<i>Tabebuia rosea</i>	\bar{x}	622	14373	626	13469	+0,8	-6,3
	σ	44	1669	29	973	-	-
	CV	7,1	11,6	4,6	7,2	-34,8	-37,8
<i>Juglans pyriformis</i>	\bar{x}	695	11569	740	9449	+6,6	-18,3
	σ	58	1595	51	1304	-	-
	CV	8,3	13,8	7,0	13,8	-16,0	+0,1

Leyenda: ρ_{CH} = Densidad; E_{vt} = Módulo dinámico; Δ = Variación aritmética madera sólida/madera laminada; \bar{x} = Media; σ = desviación estándar; CV = Coeficiente de variación en porciento. Fuente: Elaboración Propia.

La Tabla 3 presenta los resultados del experimento 2, que fijó el estado del material y consideró a la especie como el factor de variación. Contrastando los resultados específicos en las densidades y los módulos dinámicos comparados entre *Enterolobium cyclocarpum*, *Tabebuia rosea* y *Juglans pyriformis*, sea para la madera sólida o para la madera laminada, presentaron diferencias estadísticamente significativas ($P \geq 0,05$). Estos resultados tuvieron dos excepciones: la comparación entre E_{vt} EC S vs. E_{vt} TR S y E_{vt} EC S vs. E_{vt} JP S. Los resultados de las pruebas de verificación de varianza no permitieron realizar las pruebas estadísticas consecuentes.

Tabla 2. Resultados del experimento 1: Especie fija (EC, TR y JP).

	SE	CE	<i>P</i> ver-var	<i>P</i> anova	<i>P</i> K-W
Densidad (ρ_{CH})					
ρ_{CH} EC S	1,754	0,846	-	-	-
ρ_{CH} EC L	-2,044 [#]	2,225 [#]	-	-	-
ρ_{CH} EC S vs. ρ_{CH} EC L	-	-	0,260	-	< 0,001*
ρ_{CH} TR S	-3,254 [#]	3,570 [#]	-	-	-
ρ_{CH} TR L	1,096	-	-	-	-
ρ_{CH} TR S vs. ρ_{CH} TR L	-	-	0,299	-	0,764
ρ_{CH} JP S	3,626 [#]	2,854 [#]	-	-	-
ρ_{CH} JP L	1,324	-	-	-	-
ρ_{CH} JP S vs. ρ_{CH} JP L	-	-	0,767	-	<0,001*
Módulo dinámico (E_{vt})					
E_{vt} EC S	-1,178	0,328	-	-	-
E_{vt} EC L	-0,065	1,534	-	-	-
E_{vt} EC S vs. E_{vt} EC L	-	-	0,749	< 0,001*	-
E_{vt} TR S	-2,304 [#]	0,804	-	-	-
E_{vt} TR L	0,509	-	-	-	-
E_{vt} TR S vs. E_{vt} TR L	-	-	0,037*	-	0,002*
E_{vt} JP S	1,125	0,253	-	-	-
E_{vt} JP L	-0,164	-	-	-	-
E_{vt} JP S vs. E_{vt} JP L	-	-	0,280	<0,001*	-

Leyenda: EC = *Enterolobium cyclocarpum*; TR = *Tabebuia rosea*; JP = *Juglans pyriformis*; S = Madera sólida; L = Madera laminada; SE = Sesgo estandarizado; CE = Curtosis estandarizada; # = Valor fuera del intervalo [-2, +2]; ver-var = Igualdad de varianzas; anova = Análisis de varianzas; K-W = Prueba de *Kruskal-Wallis*; *P* = Valor *P* (95% de confiabilidad); * Diferencia estadísticamente significativa ($P \leq 0,05$). Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Resultados del experimento 2: Estado fijo (S y L).

	<i>P</i> ver-var	<i>P</i> anova	<i>P</i> K-W
Densidad (ρ_{CH}) Estado fijo (S)			
ρ_{CH} EC S vs. ρ_{CH} TR S	0,520	-	< 0,001*
ρ_{CH} EC S vs. ρ_{CH} JP S	0,963	-	< 0,001*
ρ_{CH} TR S vs. ρ_{CH} JP S	0,574	-	< 0,001*
Densidad (ρ_{CH}) Estado fijo (L)			
ρ_{CH} EC L vs. ρ_{CH} TR L	0,233	-	< 0,001*
ρ_{CH} EC L vs. ρ_{CH} JP L	0,116	-	< 0,001*
ρ_{CH} TR L vs. ρ_{CH} JP L	-	< 0,001*	-
Módulo dinámico (E_{vt}) Estado fijo (S)			
E_{vt} EC S vs. E_{vt} TR S	0,013*	-	-
E_{vt} EC S vs. E_{vt} JP S	0,003*	-	-
E_{vt} TR S vs. E_{vt} JP S	0,977	-	< 0,001*
Módulo dinámico (E_{vt}) Estado fijo (L)			
E_{vt} EC L vs. E_{vt} TR L	0,800	< 0,001*	-
E_{vt} EC L vs. E_{vt} JP L	0,110	< 0,001*	-
E_{vt} TR L vs. E_{vt} JP L	0,146	< 0,001*	-

Leyenda: EC = *Enterolobium cyclocarpum*; TR = *Tabebuia rosea*; JP = *Juglans pyriformis*; S = Madera sólida; L = Madera laminada; ver-var = Igualdad de varianza; anova = Análisis de varianza; K-W = Prueba de *Kruskal-Wallis*; *P* = Valor *P* (95% de confiabilidad); * Diferencia estadísticamente significativa ($P \leq 0,05$). Fuente: Elaboración propia.

La Figura 2 explica los resultados del experimento 3. Estos graficados en las dispersiones, las regresiones lineales y los coeficientes de determinación entre la densidad y el módulo dinámico, ambos entre la madera laminada dependiente de la madera sólida. La densidad de la madera sólida explica el 69% de la predicción sobre la densidad de la

madera laminada. Igualmente, el módulo dinámico de la madera sólida explica el 50% de la predicción correspondiente al módulo dinámico de la madera laminada.

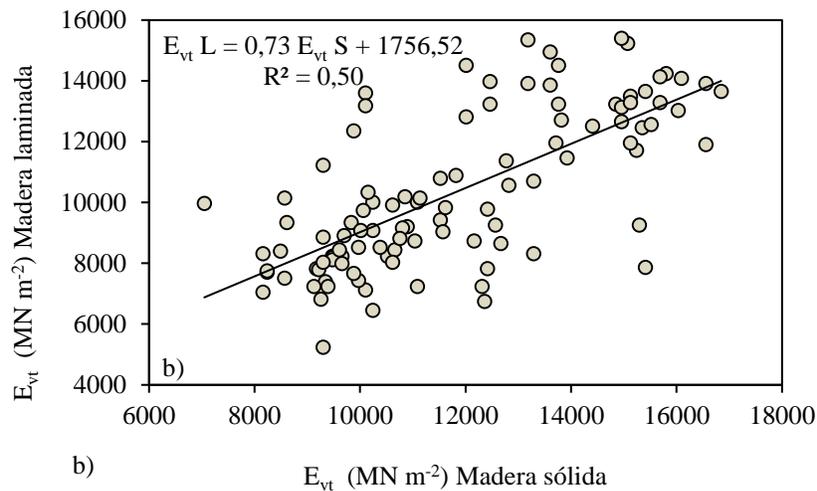
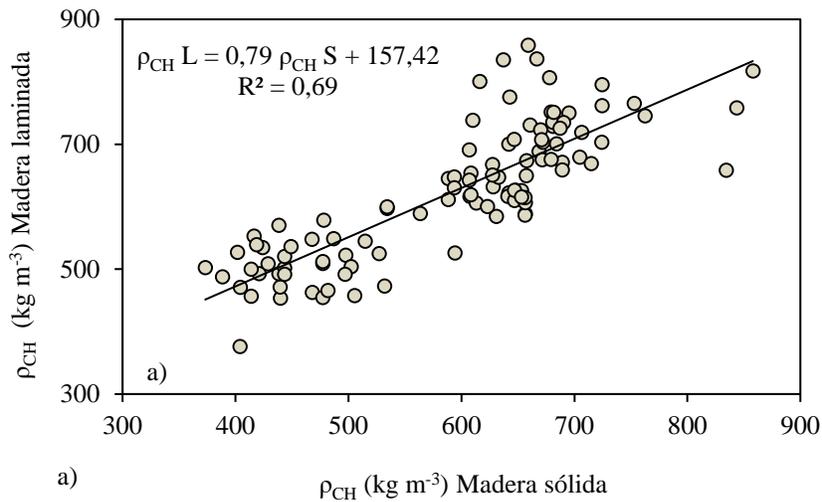


Fig. 2 Resultados del experimento 3: Regresiones lineales ($y = ax \pm b$), y coeficientes de determinación (R^2); a) Densidad; b) Módulo dinámico. Por razones de escala, en las figuras no se visualizan los 105 puntos experimentales. Fuente: Elaboración propia

DISCUSIÓN

La densidad de la madera laminada aumentó en comparación con la de la madera sólida. Esto para las tres especies estudiadas, con la peculiaridad de que la densidad de la madera laminada de *Tabebuia rosea* exhibió un incremento pequeño. Este resultado coincide con el propósito de incrementar artificialmente la densidad de una especie de madera en particular, al emplear el tratamiento de laminado. Esta estrategia se respalda en uno de los paradigmas vigentes en Ciencias, Tecnología e Ingeniería de la Madera; el cual propone que las características de resistencia mecánica de la madera, en este caso el módulo dinámico, aumentan proporcionalmente a la densidad (Niklas & Spatz, 2010). Los resultados de esta investigación indican lo contrario: el módulo dinámico de la madera laminada, en comparación con el de la madera sólida, disminuyó para las tres especies. Esto a pesar del aumento artificial de la densidad.

Las condiciones de laboratorio fueron controladas, las pruebas se realizaron de la misma forma y se fijaron las principales fuentes posibles de variación de los resultados. Es decir, el tipo de adhesivo utilizado en la fabricación de la madera laminada, la configuración y dimensiones de las probetas, y el contenido de humedad de la madera. Se observó una disminución en los coeficientes de variación para la madera sólida y para la madera laminada. Este resultado fue el mismo para la densidad y el módulo dinámico de las tres especies estudiadas. Excepción a este resultado fue el aumento importante del coeficiente de variación del módulo dinámico para *Enterolobium cyclocarpum*, y el casi insignificante incremento estadístico para el módulo dinámico de *Juglans pyriformis*.

Desde el punto de vista del análisis estadístico, la densidad de la madera laminada, respecto a la madera sólida, fue diferente para *Enterolobium cyclocarpum* y *Juglans pyriformis*. En cambio, no lo fue para *Tabebuia rosea*. Para el caso del módulo dinámico, la diferencia estadística fue observada en las tres especies.

En ese contexto, los resultados de la densidad y del módulo dinámico mostraron diferencias estadísticamente significativas. Ambos fueron

comparados estudiando la madera laminada frente a la madera sólida, y diferenciando las tres especies. Es decir, cada parámetro es distinto según la especie y si se trata de madera sólida o laminada. En relación a la calidad de las predicciones propuestas por las regresiones $\rho_{CH} L = f(\rho_{CH} S)$ y $E_{vt} L = f(E_{vt} S)$, en el caso de la densidad, el coeficiente de determinación es aceptable en investigación con especies tropicales (Del Menezzi *et al.*, 2013). Este resultado sugiere que la densidad de la madera laminada aumenta en comparación con la densidad de la madera sólida. No así, en el caso del módulo dinámico. Su predicción es baja en comparación con las reportadas en la bibliografía (Teles *et al.*, 2011). Es decir, el módulo dinámico no aumenta necesariamente en proporción al de la madera sólida. Ambas conclusiones se proponen a partir de las correlaciones en los datos de las tres especies combinadas, así mismo representan una tendencia general del fenómeno.

Las diferencias aritméticas entre los resultados para la madera laminada y sólida varían de acuerdo a cada especie. Así mismo, las diferencias estadísticamente significativas difieren igualmente de acuerdo a la especie y al estado de la madera, sea laminada o sólida. En efecto, la bibliografía refiere el paradigma contemporáneo en Ciencias de la Madera que rige en investigación e ingeniería de la madera (Sotomayor y Correa, 2016): “...*Es necesario caracterizar el comportamiento mecánico de la madera con un enfoque de experimentación de caso por caso de una especie en particular. Cada procedimiento debe estar referido a las variables de referencia de las condiciones de ensayo, por ejemplo, la densidad y el contenido de humedad de la madera, y con datos derivados de un tamaño de muestra observada estadísticamente representativa. Una vez teniendo observaciones integrantes y estadísticamente representativas, se pueden proponer tendencias en el comportamiento general para una especie en específico, y/o por agrupamiento de varias de ellas que denoten una tendencia similar*”. De manera que los resultados de esta investigación confirman esta propuesta, conclusión que se encuentra acotada para *Enterolobium cyclocarpum*, *Tabebuia rosea* y *Juglans pyriformis*.

CONCLUSIONES

Se determinaron la densidad y el módulo dinámico por vibraciones transversales, de madera sólida y laminada, en tres especies: *Enterolobium cyclocarpum*, *Tabebuia rosea* y *Juglans pyriformis*.

La densidad de la madera laminada aumentó en comparación con la de la madera sólida. En contraste, el módulo dinámico de la madera laminada disminuyó para las tres especies, en comparación con el de la madera sólida.

El modelo de regresión lineal propuesto predice que la densidad de la madera sólida explica el 69% de la densidad de la madera laminada. Finalmente se puede señalar que, potencialmente, el módulo dinámico de la madera sólida explica el 50% de la predicción correspondiente al módulo dinámico de la madera laminada.

AGRADECIMIENTOS

La investigación estuvo patrocinada por la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México. También un agradecimiento al profesor Juan Zárate Medina por facilitar el equipo para efectuar las pruebas dinámicas.

REFERENCIAS

Alméras, T., A. Thibaut & J. Gril. 2005. Effect of circumferential heterogeneity of wood maturation strain, modulus of elasticity and radial growth on the regulation of stem orientation in trees. *Trees*. 19(4): 457-467.

American Society of Testing and Materials International. 2012. *ASTM D6874-12. Standard Test Methods for Nondestructive Evaluation of Wood-Based Flexural Members Using Transverse Vibration*. West Conshohocken: American Society of Testing and Materials International. 8 p.

Araujo Molina, O., M. Cerón Cardaña, M. Chan Martín & M. Azueta García. 2005. Resistencia a la flexión de vigas laminadas con tres especies de madera tropical mexicana. *Ingeniería*. 9(1): 5-12.

Bal, B. C. & I. Bektaş. 2012. The effects of wood species, load direction, and adhesives on bending properties of laminated veneer lumber. *BioResources*. 7(3): 3104-3112.

Bourreau, D., Y. Aimene, J. Beauchêne & B. Thibaut. 2013. Feasibility of glued laminated timber beams with tropical hardwoods. *European Journal of Wood and Wood Products*. 71(5): 653-662

Cordero, J. & D. H. Boshier. 2003. *Árboles de Centroamérica*. Turrialba: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. 1079 p.

Dackermann, U., K. Crews, B. Kasal, J. Li, M. Riggio, F. Rinn & T. Tannert. (2014). In situ assessment of structural timber using stress-wave measurements. *Materials and Structures*. 47(5), 787-803.

Del Menezzi, C., L. Mendes, M. de Souza & G. Bortoletto Jr. 2013. Effect of Nondestructive Evaluation of Veneers on the Properties of Laminated Veneer Lumber (LVL) from a Tropical Species. *Forest*. 4(2): 270-278.

Erdil, Y. Z., A. Kasal, J. Zhang, H. Efe & T. Dizei. 2009. Comparison of mechanical properties of solid wood and laminated veneer lumber fabricated from Turkish beech, Scotch pine, and Lombardy poplar. *Forest Products Journal*. 59(6): 55-60.

Hayashi, T. & A. Miyatake. 2015. Recent research and development on sugi (Japanese cedar), structural glued laminated timber. *Journal of Wood Science*. 61(4): 337-342.

International Organization for Standardization. 2012. *ISO 3129:2012. Wood. Sampling methods and general requirements for physical and*

mechanical testing of small clear wood specimens. Geneva: International Organization for Standardization. 9 p.

International Organization for Standardization. 2014a. *ISO 13061-1:2014. Wood. Determination of moisture content for physical and mechanical tests*. Geneva: International Organization for Standardization. 4 p.

International Organization for Standardization 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. 5 p.

International Organization for Standardization 2014c. *ISO 13061-4:2014. Physical and mechanical properties of wood. Test methods for small clear wood specimens. Part 4: Determination of modulus of elasticity in static bending*. Geneva: International Organization for Standardization. 6 p.

Keskin, H. 2009. Impact of impregnation chemical on the bending strength of solid and laminated wood materials. *Materials and Design*. 30(3): 796-803.

Komariah, R. N., Y. S. Hadi, M. Y. Massijaya & J. Suryana. 2015. Physical-Mechanical Properties of Glued Laminated Timber Made from Tropical Small-Diameter Logs Grown in Indonesia. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*. 43(2): 156-167.

Machek, L., H. Militz & R. Sierra-Alvarez. 2001. The use of an acoustic technique to assess wood decay in laboratory soil-bed tests. *Wood Science and Technology*. 34(6): 467-472.

Nadir, Y. & P. Nagarajan. 2014. The behavior of horizontally glued laminated beams using rubber Wood. *Construction and Building Materials*. 55: 398-405.

Niklas, K. J. & H. C. Spatz. 2010. Worldwide correlations of mechanical properties and green wood density. *American Journal of Botany*. 97(10): 1587-1594.

Pellerin, R. F. & R. J. Ross. 2002. *Nondestructive Evaluation of Wood*. Peachtree Corners: Forest Products Society. 210 p.

Ribeiro, A. S., A. M. P. de Jesus, A M. Lima & J. L. C. Lousada. 2009. Study of strengthening solutions for glued-laminated wood beams of maritime pine wood. *Construction and Building Materials*. 23(8): 2738-2745.

Senalik, C. A., G. Schueneman & R. J. Ross. 2014. *Ultrasonic-based nondestructive evaluation methods for wood: a primer and historical review*. Madison: Forest Products Laboratory. 36 p.

Silva Guzmán, J. A., F. J. Fuentes Talavera, R. Rodríguez Anda, P. A. Torres Andrade, M. A. Lomelí Ramírez, J. Ramos Quirarte, C. Waitkus & H. G. Richter. 2010. *Fichas de propiedades tecnológicas y usos de maderas nativas de México e importadas*. México: Comisión Nacional Forestal. 186 p.

Sotomayor Castellanos, J. R. 2015. *Banco FITECMA de características físico-mecánicas de maderas mexicanas*. Morelia: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 65 p.

Sotomayor Castellanos, J. R., I. Carmona Delgado, I. Cervantes Móreles, D. Garduño Suárez, D. Z. Jiménez Guzmán, R. Lemus Durán, D. Maldonado Correa, A. Pérez Tello, M. A. Vaca Hernández & O. Valdez Velázquez. 2015. Madera laminada de *Pinus pseudostrabus*. Caracterización dinámica con métodos no destructivos. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. 11(3): 4-34.

Sotomayor Castellanos, J. R. & S. Correa Jurado. 2016. Retención de sales de boro en la madera y su efecto en el módulo de elasticidad dinámico. *Revista Científica*. 24(1): 67-76.

Tamarit Urias, J. C. & J. L. López Torres. 2007. *Xilotecnología de los principales árboles tropicales de México*. Tlahuapan: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. 264 p.

Teles, R. F., C. S. Del Menezzi, F. de Souza & M. R. de Souza. 2011. Nondestructive evaluation of a tropical hardwood: interrelationship between methods and physical-acoustical variables. *Ciência da Madeira*. 2(1): 01-14.

Tenorio, C., R., Moya & F. Muñoz. 2011. Comparative study on physical and mechanical properties of laminated veneer lumber and plywood panels made of wood from fast-growing *Gmelina arborea* trees. *Journal of Wood Science*. 57(2): 134-139.

Villaseñor Aguilar, J. M. & J. R. Sotomayor Castellanos. 2015. Caracterización dinámica de la madera de *Fraxinus americana* y *Fraxinus uhdei*. *Revista de Aplicación Científica y Técnica*. 1(1): 43-53.

Yoshihara, H. 2012. Examination of the specimen configuration and analysis method in the flexural and longitudinal vibration tests of solid wood and wood-based materials. *Forest Products Journal*. 62(3): 191-200.

Recibido 09 de mayo de 2018, aceptado 18 de junio de 2018.