

Determinación por ondas de esfuerzo del módulo dinámico en madera laminada de *Pinus pseudostrobus*

Javier Ramón Sotomayor Castellanos

Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, UMSNH

Resumen

El objetivo de la investigación fue determinar por ondas de esfuerzo, el módulo dinámico en madera laminada de *Pinus pseudostrobus*. A partir de tabletas de madera aserrada, se fabricaron 24 probetas de madera laminada de *P. pseudostrobus* con dimensiones de 0,049 m x 0,053 m x 0,79 m. Para la madera aserrada y la laminada, se calcularon su densidad y su contenido de humedad y se realizaron pruebas de ondas de esfuerzo en la dirección longitudinal. Se midió la velocidad de onda y se calculó el módulo dinámico y el efectivo. La velocidad de onda en la madera laminada fue 3,1% menor que en la madera aserrada y el coeficiente de variación aumentó 173%. El módulo dinámico fue 3,6% menor en comparación con el de la madera aserrada, pero el coeficiente de variación aumentó 95,9%. El módulo efectivo de la madera laminada fue 5,98% mayor que el módulo dinámico experimental y el coeficiente de variación fue similar al de la madera aserrada. Los resultados de los módulos dinámico y efectivo fueron superiores a los reportados en un estudio anterior empleando el mismo material experimental, pero empleando un aparato diferente para la medición de la velocidad de onda. Si bien,

los dos aparatos miden el tiempo de transmisión de ondas de esfuerzo, en este caso de estudio esta distinción fue el factor de variación en los resultados.

Palabras clave: Métodos no destructivos, densidad de la madera, módulo efectivo.

Abstract

Determination by stress waves of the dynamic module in laminated wood of *Pinus pseudostrobus*. The objective of the research was to determine by dynamic stress waves the dynamic modulus in laminated wood of *Pinus pseudostrobus*. From lumber tablets, 24 specimens of laminated wood of *P. pseudostrobus* with dimensions of 0,049 m x 0,053 m x 0,79 m were fabricated. For sawnwood and laminate, its density and moisture content were calculated and stress waves were tested in the longitudinal direction. The wave velocity was measured and the dynamic modulus and the effective modulus were calculated. The wave velocity in laminated wood was 3.1% lower than in sawnwood and the coefficient of variation increased 173%. The dynamic modulus was 3.6% lower compared to that of sawnwood, but the coefficient of variation increased 95.9%. The effective modulus of laminated wood was 5.98% greater than the experimental dynamic modulus and the coefficient of variation was similar to that of sawnwood. The results of the dynamic and effective modules were higher than those reported in an earlier study using the same experimental material but using a different apparatus for the measurement of the wave velocity. Although the two devices measure the transmission time of stress waves, in this case study this distinction was the factor of variation in the results.

Key words: Non-destructive methods, density of wood, effective module.

Introducción

La madera laminada es un producto de ingeniería con buena resistencia elástica y que proporciona amplias posibilidades en los proyectos arquitectónicos (Charleson y Perez, 2009), de aquí que la madera reconstituida es una tendencia contemporánea en el desarrollo de tecnología de la madera (American Institute of Timber Construction, 2007).

La literatura sobre madera laminada se orienta principalmente al estudio de vigas laminadas. Algunos trabajos relevantes sobre investigaciones particulares son: sobre el efecto del adhesivo, de Almeida *et al.* (2014) y Neto *et al.* (2014); acerca

del modelado numérico empleando el método del elemento finito, Gao *et al.* (2015) y Kandler *et al.* (2015); y en relación a las propiedades tecnológicas de la madera, la tecnología de fabricación y su influencia en las características mecánicas de vigas laminadas: Ninin *et al.* (2010), Iwakiri *et al.* (2014), Kwon *et al.* (2014), Dietsch y Tannert (2015) y Lahr *et al.* (2015).

En el mismo contexto se pueden mencionar trabajos recientes acerca de la facilidad de introducir especies tropicales en la fabricación de vigas laminadas (Bourreau *et al.*, 2013); relacionado con las aplicaciones de elementos estructurales en arquitectura (Kuzman *et al.*, 2010). En lo concerniente con la fabricación y calidad de vigas de madera laminada está regulada, entre otras, en las normas ANSI A190.1-2017 (American National Standard Institute, 2017), ANSI 405-2013 (APA. The Engineering Wood Association, 2013) y ANSI 117-2015 (APA. The Engineering Wood Association, 2015)

Información complementaria sobre el tópico de investigación puede ser consultada en: Kuklik (2008a), Kuklik (2008b), Confemadera (2010), Forest Products Laboratory (2010), Orbe *et al.* (2010) y Bucur (2011).

Por otra parte, información relacionada con las características técnicas y de fabricación de madera laminada se encuentra reportada, entre otros documentos, en la guías de soluciones técnicas en madera laminada de empresas como Metsä Wood (<http://www.metsawood.com/>), de la Asociación de Madera de Ingeniería (<https://www.apawood.org/>), del Consejo Americano de la madera (<http://www.awc.org/>), del Consejo Canadiense de la madera (<http://cwc.ca/>) y del Instituto Americano de Construcción con Madera (<http://www.aitc-glulam.org/index.asp>).

Respecto al empleo de métodos no destructivos en la caracterización de vigas de madera laminada, se pueden citar entre otros a Yang *et al.* (2008), Neuenschwander *et al.* (2013); Sanabria *et al.* (2013) y Nowak *et al.* (2015). En México, Araujo *et al.* (2005) reporta datos sobre viguetas de madera laminada de especies tropicales. Además, Sotomayor *et al.* (2015) reportan investigaciones sobre la madera laminada de *P. pseudostrobus* estudiada por ultrasonido empleando el aparato *Sylvatest*®, así como por ondas de esfuerzo empleando el aparato *Metriguard*®. No se encontraron otros antecedentes de investigaciones de viguetas de madera laminada estudiadas con ondas de esfuerzo empleando el aparato *Fakkop*®.

A manera de síntesis, se puede argumentar que los trabajos citados pretenden, a través de la reconstitución de la madera, aprovechar de manera eficiente el

consumo de materia prima forestal y mejorar la tecnología de fabricación y empleo de vigas de madera laminada.

El objetivo de la investigación fue determinar por ondas de esfuerzo el módulo dinámico en madera laminada de *P. pseudostrobus*.

Materiales y métodos

La metodología general de la investigación es la reportada por Sotomayor *et al.* (2015). Para las mediciones de la velocidad de las ondas de esfuerzo los autores citados utilizaron el aparato *Metriguard*®, y en la presente investigación se empleó el aparato *Fakkop*®.

Con el objeto de seguir las etapas de fabricación de madera laminada a nivel industrial: acondicionamiento de la madera, caracterización mecánica, pegado, ensamblado y terminado (Walker, 2006), se recolectaron piezas de madera aserrada de *Pinus pseudostrobus* Lindl. var. *pseudostrobus*, en empresas de transformación de productos forestales de la región de Ciudad Hidalgo (19° 41' 30" N - 100° 33' 13" O), Michoacán. Las piezas de madera tenían dimensiones comerciales y se adquirieron en estado seco por estufado. A continuación, se elaboraron, seleccionaron y se caracterizaron tabletas de madera, para simular elementos constitutivos de madera aserrada. Posteriormente, se fabricaron probetas de madera laminada de pequeñas dimensiones, representando vigas o columnas de madera laminada.

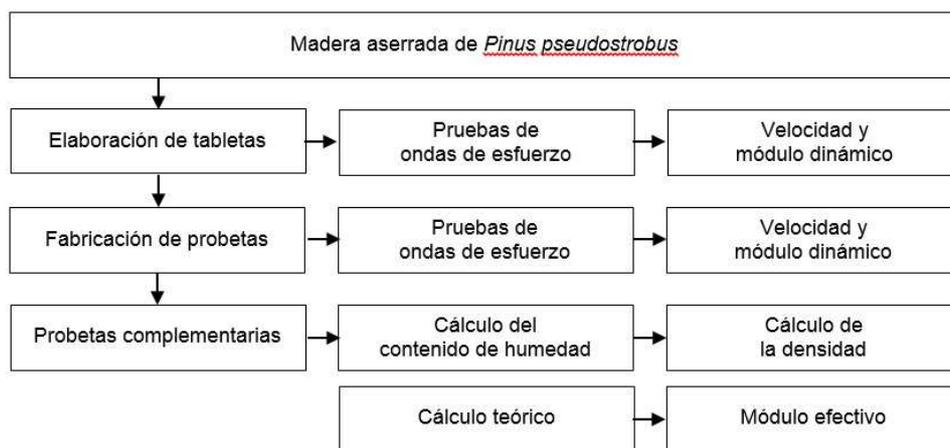


Figura 1. Estrategia experimental.

Para la caracterización mecánica la estrategia experimental consistió en determinar los módulos dinámicos en la muestra de tabletas de madera y posteriormente determinar los módulos dinámicos de las probetas. La estrategia experimental general se presenta en la Figura 1.

Elaboración de tabletas

A partir de las piezas de madera aserrada, se prepararon 24 tabletas con sección transversal de 0,05 m de ancho, 0,01 m de espesor y de 0,8 m de largo (Figura 2). Estas tabletas se destinaron para las pruebas no destructivas, antes de incorporarlas en la fabricación de las probetas de madera laminada. Al mismo tiempo, con las mismas dimensiones y a partir del mismo lote de madera de *P. pseudostrobus*, se prepararon 96 tabletas adicionales para fabricar las probetas de madera laminada. Las dimensiones de las 120 tabletas correspondieron a las direcciones radial, tangencial y longitudinal del plano leñoso. La madera se conservó en una cámara de acondicionamiento con una temperatura de 20 °C (± 1 °C) y una humedad relativa del aire de 65% ($\pm 2\%$), hasta que su peso fue constante.

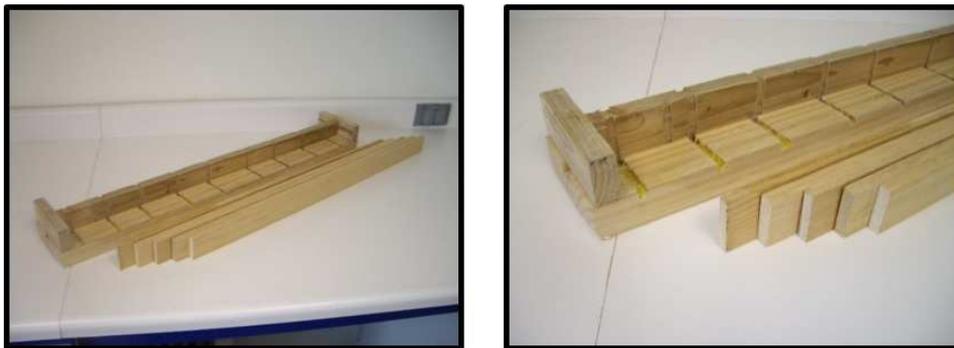


Figura 2. Tabletillas de madera de *P. pseudostrobus* y dispositivo para el armado de las probetas (Sotomayor *et al.*, 2015).

Fabricación de probetas

Para la fabricación de las probetas se posicionaron las 24 tabletas ensayadas en el lugar número 3, correspondiente al centro de cada una de las probetas (Figura 3), de tal forma que para la comparación de resultados se tuvo una tableta representativa y correspondiente a cada probeta.

Para adherir las tabletas se aplicaron 2,5 kg m⁻² de pegamento de contacto a base de resina de poliacetato de vinilo, repartidos en las cuatro caras interiores de las probetas, correspondientes al plano longitudinal-radial. Una vez armadas las

Determinación por ondas de esfuerzo del módulo dinámico en madera laminada ...

probetas, se posicionaron en un dispositivo *ad-hoc* (Figura 4) y se prensaron en la dirección tangencial, hasta que las probetas alcanzaron una altura o espesor uniforme de 0,053 m. El ancho de las probetas se ajustó a 0,049 m y el largo a 0,79 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 un mes en la cámara de acondicionamiento con las condiciones de temperatura y de humedad relativa del aire antes citadas, hasta que su peso fue constante.

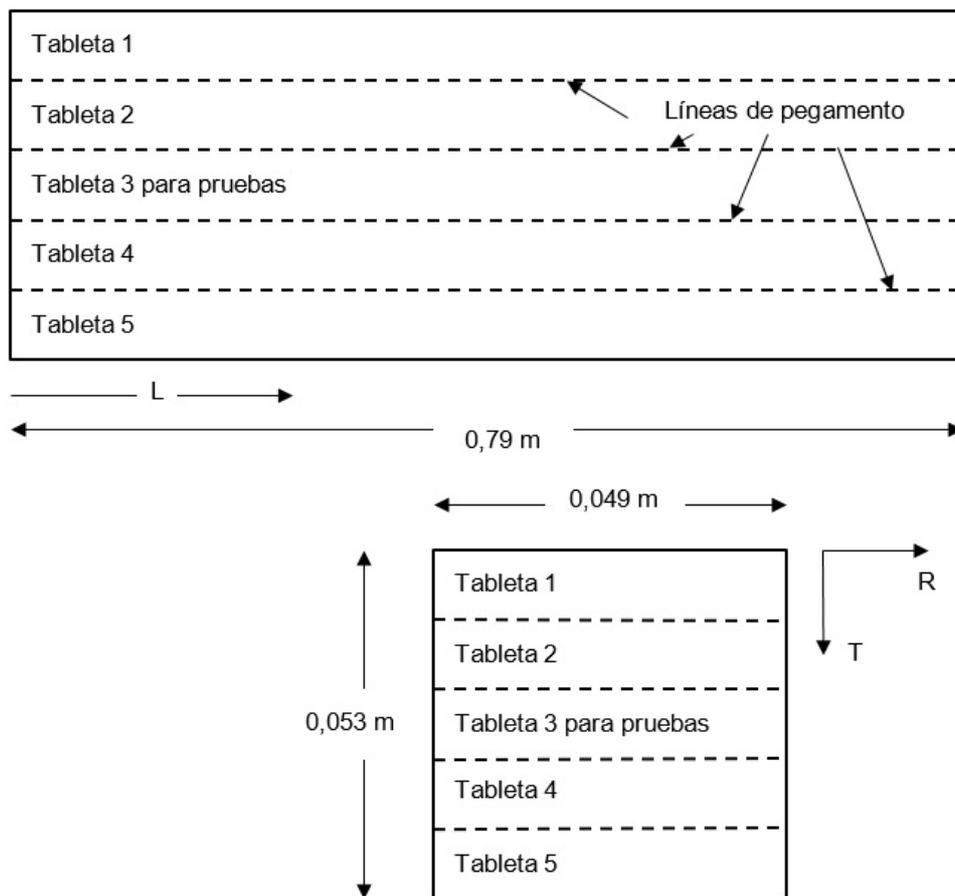


Figura 3. Diagrama de la estructura de las probetas (Sotomayor *et al.*, 2015).



Figura 4. Dispositivo de fabricación de probetas (Sotomayor *et al.*, 2015).

Contenido de humedad

El contenido de humedad de la madera se determinó con un grupo complementario de 24 probetas con dimensiones de 0,01 m x 0,05 m x 0,05 m, recortadas del mismo lote de madera con el cual se fabricaron las tabletas. El contenido de humedad de la madera se calculó con la relación peso húmedo de la probeta al momento del ensayo, en relación a su peso en estado anhidro, adaptando la norma ISO 13061-1:2014 (International Organization for Standardization, 2014a). El contenido de humedad se calculó con la fórmula (1):

$$CH = \frac{P_1 - P_2}{P_2} \times 100 \quad (1)$$

Donde:

CH = Contenido de humedad (%)

P₁ = Peso de la probeta al momento del ensayo (kg)

P₂ = Peso de la probeta en estado anhidro (kg)

Densidad

La densidad de la madera correspondiente a un contenido de humedad (CH), se calculó con la relación peso al momento del ensayo en relación con el volumen al momento del ensayo, adaptando la norma ISO 13061-2:2014 (International Organization for Standardization, 2014b). La densidad de la madera fue calculada con la fórmula (2):

$$\rho_{CH} = \frac{P_{CH}}{V_{CH}} \quad (2)$$

Donde:

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

P_{CH} = Peso de la probeta al momento del ensayo (kg)

V_{CH} = Volumen de la probeta al momento del ensayo (m^{-3})

Pruebas de ondas de esfuerzo

Las pruebas de ondas de esfuerzo consistieron en suministrar un impacto en un extremo de la tableta y/o probeta (Figura 5) y provocar una onda de esfuerzo a través de la dirección longitudinal de la madera y registrar el tiempo de transmisión necesario para que la onda llegue al extremo opuesto de la probeta. Para tal propósito se utilizó el aparato *Fakkop*® posicionado en un dispositivo para pruebas no destructivas diseñado *ad-hoc* (Figura 5). Con la longitud de las tabletas y/o probetas y el tiempo de transmisión de las ondas de esfuerzo, se calculó la velocidad de onda.



Figura 5. Pruebas de ondas de esfuerzo con el aparato *Fakkop*® en probetas de *P. pseudostrobus*.

Se calculó el módulo dinámico con la fórmula (3) propuesta por Pellerin y Ross (2002):

$$E_{oe} = \rho_{CH} v_{oe}^2 \quad (3)$$

a cada probeta. La configuración para el cálculo del módulo efectivo se presenta en la Figura 6.

El módulo efectivo se calculó con la fórmula (4) propuesta por Bodig y Jayne (1982):

$$E_{ef} = \frac{2}{I} \sum_{i=1}^n E^i [I_0^i + A^i d^i{}^2] \quad (4)$$

Donde:

E_{ef} = Módulo efectivo (N m⁻²)

I = Momento de inercia de la sección transversal de la probeta (m⁴)

E^i = Módulo dinámico de cada tableta i (N m⁻²)

I_0^i = Momento de inercia de la sección transversal de cada tableta i (m⁴)

A^i = Área de la sección transversal de cada tableta i (m²)

d^i = Distancia del centroide de cada tableta i al centroide de la probeta (m)

Diseño experimental

Las variables de respuesta fueron la densidad de la madera determinada con la fórmula (2), la velocidad de onda medida, el módulo dinámico estimado con la fórmula (3) y el módulo efectivo calculado con la fórmula (4). Para cada variable de respuesta se calcularon la media (\bar{x}), la desviación estándar (σ) y el coeficiente de variación (CV).

Se diseñaron dos experimentos siguiendo las recomendaciones de Gutiérrez y de la Vara (2012). El primer experimento consistió en pruebas de normalidad para cada variable, calculando el apuntalamiento (A) y el sesgo (S), para confirmar que los datos de las muestras provenían de distribuciones normales. Cuando la prueba de normalidad verificó que los datos provenían de distribuciones normales, se procedió a realizar el segundo experimento que consistió en pruebas t de *Student* de diferencias de medias para un nivel de confianza de 95%. La hipótesis nula $H_0: \bar{x}_1 - \bar{x}_2 = 0$ se contrastó con la hipótesis alterna $H_A: \bar{x}_1 - \bar{x}_2 \neq 0$. Los cálculos estadísticos fueron realizados con el programa *Statgraphics*®.

Resultados y análisis

La Tabla 1 presenta los resultados de la densidad, velocidad de onda, módulo dinámico y módulo efectivo para *P. pseudostrobus* resultados comparables a los reportados por Sotomayor *et al.* (2015) para pruebas de ondas de esfuerzo, pero utilizando el aparato *Metriguard*®. Por su parte, la Tabla 2 exhibe los resultados de las pruebas de normalidad y de hipótesis donde para todas las variables, los valores de sesgo y apuntalamiento se situaron dentro del intervalo -2 a +2, lo que permitió confirmar la normalidad de las muestras.

TABLA 1
Densidad, velocidad de onda, módulo dinámico y módulo efectivo para *P. pseudostrobus*.

Madera aserrada				
	ρ_{CH} (kg m ⁻³)	V_{oe} (m s ⁻¹)	E_{oe} (MN m ⁻²)	-
\bar{x}	514	5076	13253	-
σ	15,18	100	674	-
CV	2,95	1,97	5,09	-
Madera laminada				
	ρ_{CH} (kg m ⁻³)	V_{oe} (m s ⁻¹)	E_{oe} (MN m ⁻²)	E_{ef} (MN m ⁻²)
\bar{x}	527	4920	12781	13545
σ	10,38	264	1274	689
CV	1,97	5,37	9,97	5,09

ρ_{CH} = Densidad; V_{oe} = Velocidad de onda; E_{oe} = Módulo dinámico; E_{ef} = Módulo efectivo; \bar{x} = Media; σ = Desviación estándar; CV = Coeficiente de variación en porciento.

Contenido de humedad

El contenido de humedad fue en promedio de 14,5%, con una desviación estándar de 0,73, lo que resultó en un coeficiente de variación del 5%.

Densidad

La densidad de la madera laminada es 2,5% mayor que la densidad de la madera aserrada. Igualmente, el coeficiente de variación disminuyó 33,3% (Tabla 1). La

Determinación por ondas de esfuerzo del módulo dinámico en madera laminada ...

diferencia puede ser explicada por la contribución de la masa del adhesivo incorporado en la madera laminada. Esta diferencia se expresa igualmente en el resultado de la prueba de diferencia de medias (Tabla 2) donde el estadístico *t* de *Student* fue menor a 0,05, lo que implica que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de la densidad de la madera aserrada y de la laminada.

TABLA 2
Resultados pruebas de normalidad y de hipótesis.

Estadístico	Madera aserrada	Madera laminada	<i>t</i> de <i>Student</i>
	ρ_{CH}	ρ_{CH}	
S	-0,8314	0,0346	*
A	-0,5267	-0,3487	*
P	-	-	0,0016**
	V_{oe}	V_{oe}	
S	-1,7452	-1,3436	*
A	1,1844	-0,8557	*
P	-	-	0,0096**
	E_{oe}	E_{oe}	
S	0,3447	-1,4045	*
A	0,6810	-0,8244	*
P	-	-	0,1152
	E_{ef}	E_{ef}	
S	-1,4045	0,3449	-
A	-0,8244	0,6822	-
P	-	-	0,0130**

ρ_{CH} = Densidad; V_{oe} = Velocidad de onda; E_{oe} = Módulo dinámico; E_{ef} = Módulo efectivo. P = Valor de significancia. * Normalidad sesgo (S): $-2 < S < +2$; Normalidad apuntalamiento (A): $-2 < A < +2$; ** Valor P < 0,05: existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 2 variables con un nivel de confianza del 95%.

Velocidad de onda

La velocidad de onda en la madera laminada fue 3,1% menor que en la madera aserrada y el coeficiente de variación aumentó 173% (Tabla 1). En el mismo contexto, la prueba de hipótesis concluyó en una diferencia estadísticamente significativa entre las velocidades de onda para la madera aserrada y la madera laminada (Tabla 2). Empero, esta variabilidad observada se sitúa dentro de las

magnitudes reportadas para la variación de la velocidad de onda en la madera y productos compuestos (Sotomayor, 2015).

Módulo dinámico

El módulo dinámico fue 3,6% menor en comparación con el de la madera aserrada, pero el coeficiente de variación aumentó 95,9% (Tabla 1). Sin embargo, la prueba de diferencias de medias sugiere que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre los dos módulos dinámicos (Tabla 2). Los resultados coinciden con los reportados por Nadir y Nagarajan (2014). Sus resultados del cálculo del módulo de elasticidad en flexión estática, para vigas laminadas conformadas de madera de *Hevea brasiliensis*, con densidad de 605 kg m^{-3} , muestran que la comparación de las propiedades de flexión entre la madera aserrada y la madera laminada no tiene ninguna diferencia significativa.

Módulo efectivo

El módulo efectivo de la madera laminada fue 5,98% mayor que el módulo dinámico experimental y el coeficiente de variación fue similar al de la madera aserrada (Tabla 1). Igualmente, la Tabla 2 refiere una diferencia estadísticamente significativa entre las dos variables. El modelo empleado para el cálculo del módulo efectivo (Fórmula 4) implica los valores particulares de cada una de las tabletas que conforman la pieza laminada, sin embargo, hace abstracción de la influencia del adhesivo agregado en las superficies entre las láminas de madera.

En la determinación del módulo dinámico, posiblemente estas capas de adhesivo modifican la respuesta global de la pieza, disminuyendo, por ejemplo, la velocidad de onda. En consecuencia, al aplicar la Fórmula 4, el valor del módulo teórico será mayor que el determinado experimentalmente. Además, las diferencias en la configuración de las pruebas y el empleo de aparatos diferentes para la medición de las ondas de esfuerzo, pueden modificar los resultados.

Este resultado coincide con los reportados en la literatura. En efecto, la Figura 7 presenta las diferencias entre los valores de los módulos efectivo y dinámico reportados por Sotomayor *et al.* (2015) y los de la presente investigación. Ambos emplearon el mismo material para las tabletas que conformaron las mismas probetas de madera laminada. El módulo efectivo determinado con el aparato *MetriGuard*® fue 10,8 % menor. En su caso, el módulo dinámico fue 37,4% menor.



Figura 7. Comparación de los módulos efectivo (E_{ef}) y dinámico (E_{oe}) de esta investigación (2017) con los reportados por Sotomayor *et al.* (2015).

Estas variaciones en los valores de las velocidades y de los módulos derivados de ellas sugieren que, para una adecuada caracterización de la madera laminada con el método de ondas de esfuerzo, es necesario considerar el aparato de medición.

Desde otro punto de vista y de acuerdo con Smulski (1997), las propiedades físicas de la madera laminada usualmente son similares a las de las piezas de madera con las cuales está compuesta. Los resultados de esta investigación son diferentes. En comparación con un material compuesto de capas y adhesivo, como lo es la madera laminada de las probetas, la velocidad de las ondas de esfuerzo es mayor en un sólido de material más continuo y homogéneo, como lo es la madera aserrada de las tabletas con las cuales se elaboraron las probetas.

Conclusiones

Se determinó por ondas de esfuerzo el módulo dinámico en madera aserrada y en madera laminada de *P. pseudostrobus*. Los valores promedio de la densidad, velocidad de onda y módulo de elasticidad, son diferentes entre la madera aserrada y la de madera laminada. No obstante, el módulo dinámico no presentó una diferencia estadísticamente significativa.

El módulo efectivo calculado teóricamente a partir de los valores del módulo dinámico de la madera aserrada fue mayor al módulo medido experimentalmente.

Los resultados de los módulos dinámico y efectivo fueron superiores a los reportados en un estudio anterior empleando el mismo material experimental, pero empleando un aparato diferente para la medición de la velocidad de onda. Si bien los dos aparatos miden el tiempo de transmisión de ondas de esfuerzo, en este caso de estudio esta distinción fue el factor de variación en los resultados.

Agradecimientos

A los alumnos de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, que participaron en la preparación de las probetas. La investigación estuvo patrocinada por la Coordinación de la Investigación Científica de la misma Universidad.

Referencias

- American Institute of Timber Construction. 2007. Laminated Timber Architecture. American Institute of Timber Construction. Centennial. 16 pp.
- American National Standard Institute. 2017. ANSI A190.1-2017. Standard for Wood Products. Structural Glued Laminated Timber. American National Standard Institute. New York. 41 pp.
- Araujo M., O., Cerón C., M. y Chan Martín, M., y M. Azueta G. 2005. Resistencia a la flexión de vigas laminadas con tres especies de madera tropical mexicana. Ingeniería 9(1): 5-12.
- APA. The Engineering Wood Association. 2013. ANSI 405-2013. Standard for Adhesives for Use in Structural Glued Laminated Timber. APA. The Engineering Wood Association. Tacoma. 16 pp.
- APA. The Engineering Wood Association. 2015. ANSI 117-2015. Standard Specification for Structural Glued Laminated Timber of Softwoods Species. APA. The Engineering Wood Association. Tacoma. 62 pp.
- Bodig, J. y B.A. Jayne. 1982. Mechanics of Wood Composites. Van Nostrand Reinhold. New York. 736 pp.
- Bourreau, D., Aimene, Y., Beauchêne, J. y B. Thibaut. 2013. Feasibility of glued laminated timber beams with tropical hardwoods. European Journal of Wood and Wood Products 71(5): 653- 662.
- Bucur, V. 2011. Delamination in Wood, Wood Products and Wood-Based Composites. Springer. Dordrecht. 401 pp.
- Charleson, A. y N. Perez. 2009. Long-Span Timber Buildings. A Review of Recent International Projects. New Zealand Timber Design Journal 17(4): 19-28.

- Confemadera. 2010. Guía de construir con madera. Madrid: Confederación Española de Empresarios de la Madera. 61 pp.
- De Almeida, D.H., Calil, C., Chistoforo, A.L. y F.A.R. Lahr. 2014. Evaluation of Quality in the Adhesion of Glued Laminated Timber (Glulam) of Paricá and Lyptus Wood Species. *International Journal of Materials Engineering* 4(3): 114-118.
- Dietsch, P. y T. Tannert. 2015. Assessing the integrity of glued-laminated timber elements. *Construction and Building Materials* 101(2): 1259-1270.
- Forest Products Laboratory. 2010. Wood Handbook-Wood as an engineering material. General Technical Report FPL-GTR-190. Forest Products Laboratory. Madison. 509 pp.
- Gao, Y., Wu, Y.X., Zhu, X. D., Zhu, L., Yu, Z.M. y Y. Wu. 2015. Numerical Analysis of the Bending Properties of Cathay Poplar Glulam. *Materials* 8(10): 7059-7073.
- Gutiérrez P., H. y R. de la Vara S. 2012. Análisis y diseño de experimentos. Mc Graw Hill. México. 564 pp.
- International Organization for Standardization. ISO 13061-1:2014. 2014a. Wood. Determination of moisture content for physical and mechanical tests. International Organization for Standardization. Geneva. 11 pp.
- International Organization for Standardization. ISO 13061-2:2014. 2014b. Wood. Determination of density for physical and mechanical tests. Geneva: International Organization for Standardization. 11 pp.
- Iwakiri, S., de Matos, J.L.M., Prata, J.G., Trianoski, R., Parchen, C.F., Castro, V, G. y V.T. Iwakiri. 2014. Características de vigas laminadas coladas confeccionadas com madeira de teca (*Tectona grandis*). *Floresta e Ambiente* 21(2): 269.275.
- Kandler, G., Fußsl, J., Serrano, E. y J. Eberhardsteiner. 2015. Effective stiffness prediction of GLT beams based on stiffness distributions of individual lamellas. *Wood Science and Technology* 49(6): 1101-1121.
- Kuklik, P. 2008a. Handbook 1. Timber Structures. Prague: Leonardo da Vinci Pilot Projects. European Commission. Prague. 254 pp.
- Kuklik, P. 2008b. Handbook 2. Design of Timber Structures According to EC 5. Leonardo da Vinci Pilot Projects. European Commission. Prague. 136 pp.
- Kuzman, M.K., Oblak, L. y S. Vratuša. 2010. Glued Laminated Timber in Architecture. *Drvna Industrija* 61(3): 197- 204.

- Kwon, J.H., Shin, R.H., Ayrilmis, N. y T.H. Han. 2014. Properties of solid wood and laminated wood lumber manufactured by cold pressing and heat treatment. *Materials & Design* 62: 375-381.
- Lahr, F.A.R., Christoforo, A.L., de Campos, C.I., Morales, E.A.M., Barbosa, J.C. y T.H. Panzera. 2015. Evaluation of the Moisture Content in Stiffness Properties of Structural Glulam Beams. *Advanced Materials Research* 1088: 676-679.
- Neto, C.C., Christoforo, A.L., Lahr, F.A.R. y C.C. Júnior. 2014. Analysis of Specie-Treatment. Adhesive Combinations for Glulam Purpose. *International Journal of Materials Engineering* 4(1): 41-47.
- Neuenschwander, J., Sanabria, S.J., Schuetz, P., Widmann, P. y M. Vogel. 2013. Delamination detection in a 90-year-old glulam block with scanning dry point-contact ultrasound. *Holzforschung* 67(8): 949-957.
- Nadir, Y. y P. Nagarajan. 2014. The behavior of horizontally glued laminated beams using rubber wood. *Construction and Building Materials* 55: 398-405.
- Ninin, P., Contreras-Miranda, W. y S.W. Valero. 2010. Influencia de las características y técnicas constructivas en las propiedades mecánicas de vigas laminadas encoladas de madera de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. *Madera y Bosques* 16(3): 23-35.
- Nowak, T., Hamrol-Bielecka, K. y J. Jasieńko. 2015. Non-destructive testing of wood. Correlation of ultrasonic and stress wave test results in glued laminated timber members. *Annals of Warsaw University of Life Sciences. Forestry and Wood Technology* 92: 317-324.
- Orbe, A., Cuadrado, J., Rojí, E. y A. Maturana. 2010. *Arquitectura y Madera*. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. Donostia-San Sebastián. 69 pp.
- Pellerin, R.F. y R.J. Ross. 2002. *Nondestructive Evaluation of Wood*. Peachtree Corners: Forest Products Society. 176 pp.
- Sanabria, S. J., Furrer, R., Neuenschwander, J., Niemz, P. y U. Sennhauser. 2013. Novel slanted incidence air-coupled ultrasound method for delamination assessment in individual bonding planes of structural multi-layered glued timber laminates. *Ultrasonics* 53(7): 1309-1324.
- Smulski, S. 1997. *Engineered Wood Products: A Guide for Specifiers, Designers & Users*. PFS Research Foundation. Madison. 215 pp.
- Sotomayor C., J.R. 2015. Banco FITECMA de características físico-mecánicas de maderas mexicanas. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia. 65 pp.

- Sotomayor C., J R., Carmona D., I., Cervantes M., I., Garduño S., D., Jiménez G., D. Z., Lemus D., R., Maldonado C., D., Pérez T., A., Vaca H., M. A. y O. Valdez V. 2015. Madera laminada de *Pinus pseudostrobus*. Caracterización dinámica con métodos no destructivos. *Investigación e Ingeniería de la Madera* 11(3): 4-34.
- Walker, J.C.F. 2006. *Primary Wood Processing. Principles and Practice*. Springer. Dordrecht. 596 p.
- Yang, T-H., Wang, S-Y., Lin, C-J. y M-J. Tsai. 2008. Evaluation of the mechanical properties of Douglas-fir and Japanese cedar lumber and its structural glulam by nondestructive techniques. *Construction and Building Materials* 22(4): 487-493.