

Módulo de elasticidad, factor de calidad e índice material de vigas de madera de *Enterolobium cyclocarpum* determinado por vibraciones transversales

Modulus of elasticity, quality factor and material index of beams of *Enterolobium cyclocarpum* wood assessed by transversal vibration

Javier-Ramón Sotomayor-Castellanos

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México
madera999@yahoo.com

José-María Villaseñor-Aguilar

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México
osmavia@yahoo.com.mx

Recibido 10 julio 2015

Aceptado 13 enero 2016

Abstract

The mechanical characterization of wood beams is a practical request for the builder. Due to wood diversity in its technological properties, it is necessary to relativize the engineering parameters by means of quality indexes, indicators that have by objective the standardization of particular values assessed experimentally. The goal of the research was to increase the value of the *Enterolobium cyclocarpum* wood and improve its appreciation as engineering material. Modulus of elasticity, quality factor and material index, were assessed by transversal vibration tests in wood beams. The natural frequency, the modulus of elasticity and its quality indicators were characteristic of the beams sample studied and to the configuration of the tests realized. The modulus of elasticity are similar to the ones labelled for wood beams recommended for structural use. The density of *E. cyclocarpum* wood in the characteristic predictor of the modulus of elasticity and it is useful as reference in the computation of the indicators quality factor and quality index of beams of this species.

Keywords

Modulus of elasticity; natural frequency; quality factor; material index; wood construction.

Resumen

La caracterización mecánica de vigas de madera es un requerimiento práctico para el constructor. Debido a la diversidad en las propiedades tecnológicas de la madera, es necesario relativizar los parámetros de ingeniería, mediante indicadores de calidad. Indicadores que tienen por objeto estandarizar los valores particulares determinados experimentalmente. El



objetivo de la investigación es valorizar la madera de la especie *Enterolobium cyclocarpum* y mejorar su apreciación como material de ingeniería. Se determinaron el módulo de elasticidad, el factor de calidad y el índice material, derivados de pruebas de vibraciones transversales en vigas. La frecuencia natural, el módulo de elasticidad y sus indicadores de calidad fueron propios al grupo de vigas estudiadas y a la configuración de las pruebas realizadas. Los módulos de elasticidad son comparables con los descritos para vigas de madera recomendados para su uso estructural. La densidad de la madera de *E. cyclocarpum* es la característica que predice el módulo de elasticidad y sirve como referencia para el cálculo de los indicadores, factor de calidad e índice de calidad de vigas de esta especie.

Palabras clave

Módulo de elasticidad; frecuencia natural; factor de calidad; índice material: edificación con madera.

1. INTRODUCCIÓN

La caracterización mecánica de vigas de madera es un requerimiento práctico para el constructor. La densidad y el módulo de elasticidad se encuentran entre las principales características necesarias para el diseño y cálculo estructurales. Caso particular es el módulo dinámico para diseño probabilístico y sísmico (1).

La madera de especies mexicanas presenta una diversidad en sus características mecánicas que permite su empleo en una amplia gama de productos utilitarios. La información sobre las características mecánicas de maderas mexicanas ha sido recopilada, entre otros investigadores, por Tamarit y López (2) y Silva *et al.* (3).

Respecto a información de módulos de elasticidad determinados por métodos no destructivos y sus índices de calidad de maderas mexicanas, la literatura es escasa, con excepción de los trabajos de Sotomayor-Castellanos *et al.* (4, 5).

Debido a la diversidad en las propiedades tecnológicas de las maderas mexicanas, es necesario relativizar los parámetros de ingeniería, mediante indicadores de calidad y parámetros que tienen por objeto estandarizar los valores particulares determinados experimentalmente. No obstante, es notoria la ausencia de datos derivados de pruebas mecánicas que puedan aplicarse en el estudio del comportamiento de productos de madera funcionando en condiciones dinámicas o para fines de diseño sísmico de estructuras de madera.

2. MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO

Entre las características mecánicas de la madera necesarias para el diseño de productos y de estructuras de madera, el módulo de elasticidad determinado en condiciones dinámicas es el parámetro de referencia (6, 7).

En la literatura reciente sobre el módulo de elasticidad dinámico, se pueden destacar los siguientes trabajos: Yang *et al.* (8) estudian vigas de madera de *Pseudotsuga menzresii* con densidad de 530 kg/m^3 y determinan un módulo de elasticidad de 14,227 MPa y de *Cryptomeria japónica* con un módulo de elasticidad de 11,285 MPa con densidad de 520 kg/m^3 .

Por su parte, Sales *et al.* (9) evalúan vigas de madera de *Goupia glabra* con densidad de 954 kg/m^3 y determinan un módulo de elasticidad de 15,532 MPa. De igual forma, Alves *et al.* (10) determinan el módulo de elasticidad de vigas de cinco especies tropicales empleando el método *imput power technique*, sus módulos presentan una variación que va desde 730 MPa a 1,270 MPa, para maderas de densidad entre 590 kg/m^3 y $1,010 \text{ kg/m}^3$ y con coeficientes de variación en el intervalo de 25 % a 32 %.

Asimismo, Riggio *et al.* (11) estudian vigas de madera de *Quercus robur* y *Pinus sylvestris* con densidades de 616 kg/m^3 y 483 kg/m^3 , respectivamente. Y Nocetti *et al.* (12) estudian vigas de madera de *Castanea sativa*, con densidad de 609 kg/m^3 , y determinan un módulo de elasticidad de 14,200 MPa.

El Banco FITECMA de características físico-mecánicas de maderas mexicanas (13) reporta valores derivados de pruebas similares a las realizadas en esta investigación,

empleando probetas de pequeñas dimensiones, normalizadas y sin anomalías de crecimiento. El módulo de elasticidad en vibraciones transversales es de 5,728 MPa, para *E. cyclocarpum*, con densidad de 448 kg/m³ y contenido de humedad de 12 %.

3. ÍNDICES DE CALIDAD

Una edificación con madera puede ser modelada como un sistema compuesto por las estructuras que conforman pisos, paredes y techos, por componentes como vigas, viguetas y columnas, así como tableros y/o placas para revestimiento y conformación de muros.

Para que un componente realice plenamente su función, logre el objetivo de diseño y respete las restricciones técnicas, requiere de una correcta selección del material. En este caso, de la especie y de los atributos propios de una madera, seleccionada específicamente para el proyecto de diseño.

Los indicadores para la selección de un material son definidos como índices de calidad (14). Los índices de calidad son derivados de pruebas dinámicas y son útiles en el cálculo estructural de componentes cuya función es el aislamiento acústico, o disipación de energía, y el diseño de estructuras expuestas a eventos excepcionales, como son los sismos.

Los indicadores de calidad de la madera, relacionados con sus propiedades dinámicas, son, entre otros, el factor de calidad en vibraciones transversales (15) y el índice material en vibraciones transversales (14). Estos parámetros son derivados de la ponderación del módulo de elasticidad y de la densidad de la madera. Tienen por objeto estandarizar los valores particulares determinados experimentalmente. Un alto índice de calidad de una madera propone una mejor resistencia, en relación a su densidad y una buena apreciación como material acústico y de ingeniería.

Un índice material es la combinación de las propiedades físico-químicas de un material, las cuales caracterizan su rendimiento para una aplicación específica (14). Por ejemplo, un buen diseño de estructuras de madera puede contribuir a mejorar el ambiente sonoro en construcciones, gracias a las propiedades acústicas del material. Entre otros indicadores de calidad de los materiales de construcción, el índice material que relaciona su módulo de elasticidad con su densidad es un indicador de la calidad de la madera para usos específicos (4).

El objetivo de la investigación es valorizar la madera de la especie *E. cyclocarpum* y mejorar su apreciación como material de ingeniería. Para esto, se determinaron el módulo de elasticidad, el factor de calidad y el índice material, derivados de pruebas de vibraciones transversales en vigas.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

Se recolectaron en aserraderos del Estado de Michoacán, México, 20 vigas de la especie *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb., con sección transversal de 0.10 m x 0.15 m y longitud de 2.1 m. Las aristas de las vigas estuvieron orientadas

preferentemente en las direcciones radial, tangencial y longitudinal del plano leñoso. Las piezas fueron representativas de una muestra de vigas comerciales, de tal suerte, que su alineación y escuadría no fue simétrica. Las piezas contenían nudos y tejidos de crecimiento entrecruzados, todas estas peculiaridades propias a la especie en estudio.

La madera se adquirió con un contenido de humedad promedio de 80 %. Las vigas se almacenaron durante 6 meses en condiciones de laboratorio a una temperatura de 20 °C (± 2 °C) y una humedad relativa del aire de 65 % (± 5 %), hasta que alcanzaron un contenido de humedad promedio de 22 %, con una desviación estándar de 2.16. El contenido de humedad se midió con un higrómetro de resistencia eléctrico *Dostmann*® en tres posiciones equidistantes a lo largo de cada pieza. El promedio de las tres mediciones se calculó como el contenido de humedad de la madera al momento del ensayo. Para fines del análisis, el contenido de humedad de la madera se ajustó para la densidad y la frecuencia natural, correspondiente a un contenido de humedad del 12 %.

La densidad de la madera se calculó con el cociente entre el peso de la viga, dividido por su volumen, ambos correspondientes al momento del ensayo. Posteriormente, la densidad se ajustó para un contenido de humedad de la madera de 12 %. La fórmula empleada fue (16):

$$\rho_{12} = \frac{\rho_H}{1 + 0.0042 \times (H - 12)} \quad [1]$$

Donde:

ρ_{12} = Densidad para un CH = 12 % (kg/m³)

ρ_H = Densidad para un CH al momento del ensayo (%), para un CH = 22 %

H = Contenido de humedad al momento del ensayo (%), para un CH = 22 %

Las pruebas de vibraciones transversales consistieron en medir la frecuencia natural de vibración perpendicular a la dirección longitudinal de la probeta. Con tal propósito, se utilizó el aparato *Grindosonic*® (Fig. 1). El movimiento de las vigas se inició con un impacto elástico empleando un martillo de 300 g de peso. Las vigas fueron posicionadas sobre soportes simples en las posiciones nodales y apoyadas sobre la base o canto.

Las vibraciones fueron registradas con el sensor de vibración y las frecuencias se leyeron directamente en el aparato. Se realizaron tres sollicitaciones y su promedio se empleó en los cálculos. La frecuencia natural, al momento de las pruebas, correspondió a un CH = 22 %. La frecuencia fue ajustada a un contenido de humedad de 12 %, empleando el coeficiente de ajuste propuesto por Villaseñor-Aguilar (17) de 3.72 Hz/%. La configuración de las pruebas se presenta en la Fig. 1.

El modelo de elasticidad en vibraciones transversales fue calculado con la siguiente fórmula (18):

$$E_{vt} = \frac{4 \pi^2 L_{vt}^4 f_n^2 \rho_{12}}{m^4 r^2} \left(1 + \frac{r^2}{l_{vt}^2} K \right) \quad [2]$$

Donde:

E_{vt} = Módulo de elasticidad en vibraciones transversales (Pa)

L_{vt} = Largo de la probeta (m)

l_{vt} = Distancia entre apoyos (m)

f_n = Frecuencia natural de la probeta (Hz)

ρ_{12} = Densidad de la madera a un contenido de humedad H (kg/m³)

m, K= Constantes adimensionales (12.65, 49.48)

r = Radio de giro de la sección transversal de la probeta (m²)

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

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

A = Área de la sección transversal de la probeta (m²)

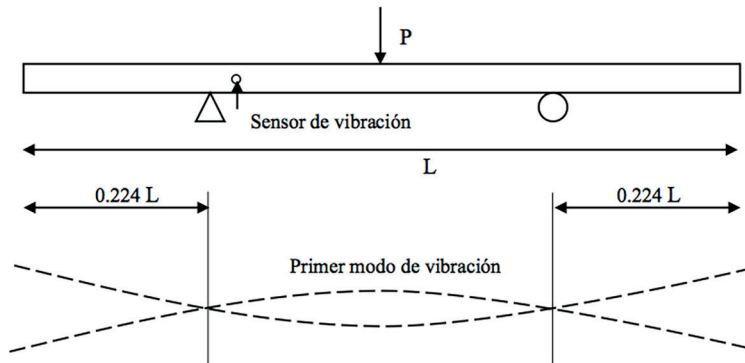


Figura 1. Configuración de las pruebas. P = Impacto; L = longitud de la viga.

El factor de calidad en vibraciones transversales se calculó con la fórmula (15):

$$F_{vt} = \sqrt{\frac{E_{vt}}{\rho_{12}^3}} \quad [3]$$

Donde:

F_{vt} = Factor de calidad de la madera en vibraciones transversales (m⁴/s • kg)

E_{vt} = Módulo de elasticidad de la madera en vibraciones transversales (Pa)

ρ_{12} = Densidad de la madera a un contenido de humedad CH (kg/m³)

El índice material en vibraciones transversales se calculó con la fórmula (14):

$$I_{vt} = \frac{E_{vt}}{\rho_{12}} \quad [4]$$

Donde:

I_{vt} = Índice material de la madera en vibraciones transversales (m^2/s^2)

E_{vt} = Módulo de elasticidad de la madera en vibraciones transversales (Pa)

ρ_{12} = Densidad de la madera a un contenido de humedad CH (kg/m^3)

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 1 presenta la densidad, la frecuencia natural, el módulo de elasticidad, el factor de calidad y el índice material de vigas de *E. cyclocarpum* para las 20 vigas estudiadas.

Tabla 1. Densidad, frecuencia natural, módulo de elasticidad, factor de calidad e índice material de vigas de *E. cyclocarpum*.

VIGA	ρ_{12} (KG/M^3)	F_n (Hz)	E_{vt} (Mpa)	F_{vt} ($M^4/S K$)	I_{vt} (M^2/S^2) X 10^{-3}
1	346	383	6,340	12.35	18.30
2	580	366	5,786	5.45	9.98
3	679	462	9,219	5.43	13.58
4	363	389	6,523	11.70	17.99
5	630	385	6,401	5.06	10.16
6	386	398	6,833	10.88	17.68
7	619	420	7,609	5.66	12.29
8	379	402	6,979	11.31	18.40
9	553	315	4,279	5.03	7.74
10	683	337	4,901	3.92	7.17
11	480	431	8,029	8.52	16.73
12	455	391	6,590	8.36	14.47
13	572	377	6,124	5.72	10.71
14	689	367	5,803	4.21	8.42
15	608	306	4,034	4.24	6.63
16	677	330	4,715	3.90	6.97
17	518	365	5,737	6.43	11.08
18	347	380	6,239	12.24	18.00
19	498	367	5,826	6.87	11.70
20	651	379	6,203	4.74	9.53
\bar{x}	536	377	6,208	7.10	12.38
σ	122	37	1,230	3.01	4.22
CV	22.79	9.93	19.81	42.33	34.06

ρ_{12} = Densidad; f_n = frecuencia natural; E_{vt} = Módulo de elasticidad; F_{vt} = Factor de calidad; I_{vt} = Índice material;

\bar{x} = Media; σ = Desviación estándar; CV = Coeficiente de variación en porcentaje.

La densidad de la madera es mayor a la reportada en el Banco FITECMA de características físico-mecánicas de maderas Mexicanas (13) y su coeficiente de variación es más amplio que el ahí referido para esta especie. Esta diferencia puede ser explicada por la variabilidad natural al interior de una misma especie. Al mismo tiempo, la muestra de vigas estudiadas es representativa de madera comercial. Esta particularidad implica que la alineación de las piezas y su escuadría no correspondieron a las direcciones de anisotropía de la madera. Además, la madera contenía nudos y tejidos de crecimiento entrecruzados.

Estas peculiaridades influyen en la determinación de características físicas y mecánicas de la madera (2, 6, 15). Sin embargo, los parámetros de ingeniería obtenidos experimentando con piezas de madera que se comercializan y se emplean en la industria son preferibles, en comparación con las características determinadas con probetas de pequeñas dimensiones y libres de defectos estructurales, propuesta que coincide con las de Íñiguez *et al.* (7) y Sales *et al.* (9).

La frecuencia natural es propia a cada una de las vigas del grupo de vigas estudiado y a la configuración de las pruebas realizadas. Su coeficiente de variación es aceptable en investigación de ciencias e ingeniería de la madera.

Los módulos de elasticidad son comparables con los descritos por los autores revisados, para maderas de diferentes especies. Los módulos van desde 7,300 MPa para madera con densidad de 590 kg/m³ (10) hasta 15,532 MPa para vigas con densidad de 954 kg/m³ (9). Los coeficientes de variación son igualmente parecidos a los reportados por los autores referidos.

En el contexto mexicano, los módulos de elasticidad son parecidos a los de maderas tropicales reportados recientemente (5). La Fig. 2 presenta la dispersión del módulo de elasticidad de *E. cyclocarpum* y de cinco especies tropicales presentadas por Sotomayor-Castellanos *et al.* (5), en función de la densidad de la madera. La media y la nube de puntos que representa la dispersión de los módulos de *E. cyclocarpum*, se sitúa proporcionalmente por debajo de la línea de correlación para las especies de referencia.

Si para fines de cálculo estructural, se considera el valor de la media de los módulos de elasticidad para *E. cyclocarpum*: $E_{vt} = 6,208$ MPa, con densidad $\rho_{12} = 536$ kg/m³, localizado en el centro de la nube de dispersión (Fig. 2), se corre el riesgo de designar, a una viga en particular, un valor característico distinto a su resistencia elástica real representada por el módulo de elasticidad.

Para el caso de *E. cyclocarpum*, los valores experimentales del E_{vt} van desde un mínimo de 4,034 MPa, propio a una viga de densidad $\rho_{12} = 346$ kg/m³, hasta un $E_{vt} = 9,219$ MPa, correspondiente a una viga con densidad $\rho_{12} = 689$ kg/m³. En realidad, solo el 45 % de las vigas (nueve piezas) tiene un módulo de elasticidad mayor que el valor promedio. En el mismo contexto, si se utiliza la correlación propuesta en la Fig. 2, empleando la densidad como característica predictora del módulo de elasticidad, se corre un riesgo del 26 % de diferir entre un valor realista y el pronosticado por el modelo. Estos resultados sugieren la precaución de emplear, cuando se diseñan estructuras de madera, un enfoque probabilístico (19), como complemento al del diseño por estados límite (20), ambos empleando datos experimentales y/o tabulados en la bibliografía especializada (21, 22).

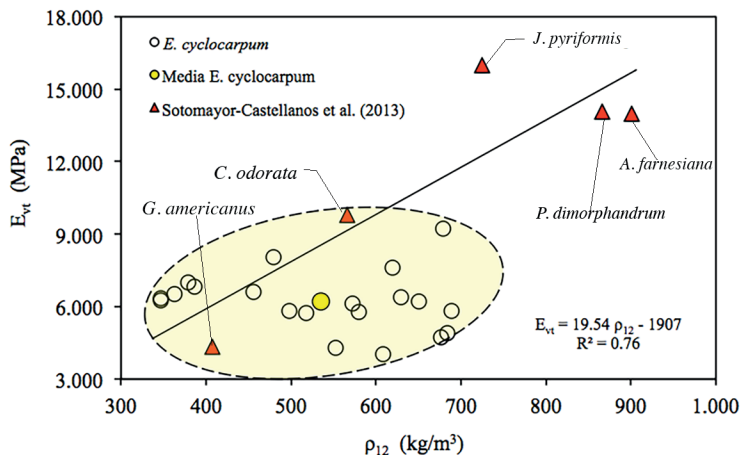


Figura 2. Dispersión del módulo de elasticidad (E_{vt}) de *E. cyclocarpum* y de cinco especies tropicales presentadas por Sotomayor-Castellanos *et al.* (5), en función de la densidad (ρ_{12}) de la madera. Correlación: $E_{vt} = 19.54 \rho_{12} - 1907$; Coeficiente de determinación $R^2 = 0.76$.

La Fig. 3 presenta la dispersión del factor de calidad de *E. cyclocarpum* y de cinco especies tropicales presentadas por Sotomayor-Castellanos *et al.* (5), en función de la densidad de la madera. El factor de calidad de las vigas de *E. cyclocarpum*, disminuye cuando la densidad de la madera aumenta y es comparable con magnitudes reportadas (5). Una vez ponderado el módulo de elasticidad, los valores de *E. cyclocarpum* parecen ceñirse a la tendencia de las maderas de referencia: $F_{vt} = -0.0076 \rho_{12} + 11.44$, con $R^2 = 0.95$. Además, la nube de dispersión se reparte alrededor de la correlación $F_{vt} = f(\rho_{12})$, presentada en la Fig. 3. El hecho de considerar el factor de calidad como un indicador de la calidad de un material, idea propuesta por Ashby (14), facilita relacionar las características de la madera entre diferentes especies. En este caso, el factor de calidad F_{vt} posiciona a la media y a los datos de cada una de las vigas de *E. cyclocarpum* cerca de la tendencia que relaciona implícitamente el módulo de elasticidad con la densidad.

La Fig. 4 presenta la dispersión del índice de calidad de *E. cyclocarpum* y de cinco especies tropicales presentadas por Sotomayor-Castellanos *et al.* (5), en función de la densidad de la madera. La magnitud de los resultados de esta investigación es comparable con la de los reportados por los autores citados. En este caso, el parámetro I_{vt} amplifica el intervalo de valores y propone un probable agrupamiento de las especies de referencia reportadas en (5). 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. Considerando que el índice material es particular a cada especie, las vigas de *E. cyclocarpum* poseen un potencial de calidad para su empleo en la industria de la construcción y en aplicaciones donde las propiedades de resistencia elástica son importantes.

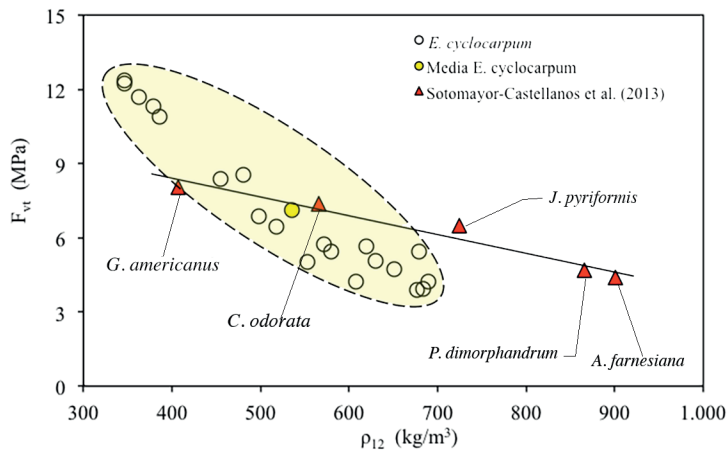


Figura 3. Dispersión del factor de calidad (F_{vt}) de *E. cyclocarpum* y de cinco especies tropicales presentadas por Sotomayor-Castellanos *et al.* (5), en función de la densidad (ρ_{12}) de la madera.

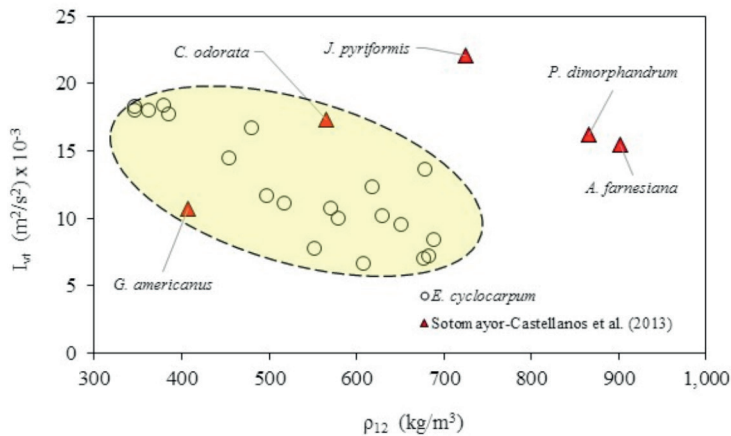


Figura 4. Dispersión del índice de calidad (I_{vt}) de *E. cyclocarpum* y de cinco especies tropicales presentadas por Sotomayor-Castellanos *et al.* (5), en función de la densidad (ρ_{12}) de la madera.

6. CONCLUSIONES

La determinación del módulo de elasticidad, del factor de calidad y del índice material, valorizan la madera de la especie *E. cyclocarpum* como material de ingeniería. Además, la densidad de la madera de *E. cyclocarpum* es la característica que predice el módulo de elasticidad y sirve como referencia para el cálculo de los indicadores, factor de calidad e índice de calidad de vigas de esta especie.

El factor de calidad, facilita relacionar las características de la madera entre diferentes especies. Igualmente, el índice material es particular a cada especie.

Las vigas de *E. cyclocarpum* poseen un potencial para su empleo en la industria de la construcción y en aplicaciones donde las propiedades de resistencia elástica son importantes.

Debido a la variabilidad en las características propias de cada pieza de madera de *E. cyclocarpum*, se recomienda tomar en cuenta el enfoque probabilístico, como complemento al del diseño por estados límite cuando se diseñan estructuras de madera.

7. AGRADECIMIENTOS

A los alumnos de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), por colaborar en los trabajos de Laboratorio. La investigación estuvo patrocinada por la Coordinación de la Investigación Científica, de la UMSNH.

8. REFERENCIAS

1. Köhler J, Sørensen JD, Faber MH. Probabilistic modeling of timber structures. *Structural Safety*. 2007; 29(4): 255-267. Inglés.
2. Tamarit Urias JC, López Torres JL. Xilotecología de los principales árboles tropicales de México. Libro técnico No. 3. México: Instituto Nacional de investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias; 2007.
3. Silva Guzmán JA, Fuentes Talavera FJ, Rodríguez Anda R *et al.* Fichas de propiedades tecnológicas y usos de maderas nativas de México e importadas. México: Universidad de Guadalajara y Comisión Nacional Forestal; 2010.
4. Sotomayor-Castellanos JR, Guridi Gómez LI, García Moreno T. Características acústicas de la madera de 152 especies mexicanas. Velocidad del ultrasonido, módulo de elasticidad, índice material y factor de calidad. Base de datos. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. 2010; 6(1): 3-32.
5. Sotomayor-Castellanos JR, Reyes Rodríguez LA, Rincón González EU *et al.* Módulos de elasticidad dinámicos e indicadores de calidad de cinco maderas mexicanas estudiadas por métodos no destructivos. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. 2013; 9(1): 3-20.
6. Brémaud I, Gril J, Thibaut B. Anisotropy of wood vibrational properties: dependence on grain angle and review of literature data. *Wood Science and Technology*. 2011; 45(4): 735-754. Inglés.
7. Íñiguez González G, Arriaga Martitegui F, Esteban Herrero M *et al.* Los métodos de vibración como herramienta no destructiva para la estimación de las propiedades resistentes de la madera aserrada estructural. *Informes de la Construcción*. 2007; 59(506): 97-105.
8. Yang T-H, Wang S-Y, Lin C-J, Tsai M-J. Evaluation of the mechanical properties of Douglas fir and Japanese cedar lumber and its structural glulam by nondestructive techniques. *Construction and Building Materials*. 2008; 22(4): 487-493. Inglés.

9. Sales A, Candian M, de Salles Cardin V. Evaluation of the mechanical properties of Brazilian lumber (*Goupia glabra*) by nondestructive techniques. *Construction and Building Materials*. 2011; 25(3): 1450-1454. Inglés.
10. Alves RJ, Magalhaes MDC, Carrasco EVM. Determination of the transverse Young's modulus (TYM) of wood by means of an input power technique. *Construction and Building Materials*. 2013; 42: 11-21. Inglés.
11. Riggio M, Sandak J, Sandak A *et al.* Analysis and prediction of selected mechanical/dynamic properties of wood after short and long-term waterlogging. *Construction and Building Materials*. 2014; 68: 444-454. Inglés.
12. Nocetti M, Brunetti M, Bacher M. Effect of moisture content on the flexural properties and dynamic modulus of elasticity of dimension chestnut timber. *European Journal of Wood Products*. 2015; 73(1): 51-60. Inglés.
13. Sotomayor-Castellanos JR. Banco FITECMA de características físico-mecánicas de maderas mexicanas. México: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo; 2015.
14. Ashby MF. *Materials selection in mechanical design*. Fourth Edition. England: Butterworth Heinemann; 2010. Inglés.
15. Spycher M, Schwarze FW, Steiger R. Assessment of resonance wood quality by comparing its physical and histological properties. *Wood Science and Technology*. 2008; 42(4): 325-342. Inglés.
16. Unterwieser H, Schickhofer G. Influence of moisture content of wood on sound velocity and dynamic MOE of natural frequency and ultrasonic runtime measurement. *European Journal of Forest Products*. 2010; 69(2): 171-181. Inglés.
17. Villaseñor-Aguilar JM. Comportamiento higroelástico de la madera de *Pinus douglasiana*. Evaluado mediante ultrasonido, ondas de esfuerzo, vibraciones transversales y flexión estática. [Tesis para optar por el grado de Maestría]. México: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera; 2007.
18. Machek L, Militz H, Sierra-Alvarez R. The influence of wood moisture content on dynamic modulus of elasticity measurements in durability testing. *Forschung verwertung*. 2001; 53(5): 97-100. Inglés.
19. Dávalos Sotelo R. Diseño probabilístico de estructuras de madera en Norteamérica. *Madera y Bosques*. 1996; 2(1): 9-31.
20. Dávalos Sotelo R, Fuentes Salinas M. Mexican standards for forest products. In: *Proceedings of the Forest Products Study Group Workshop*. USA: Forest Products Society. 2000. p. 25-30. Inglés.
21. Comisión Forestal de América del Norte. *Manual de Construcción de Estructuras Ligeras de Madera*. México: Comisión Forestal de América del Norte; 1994.

22. Gobierno del Distrito Federal. Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal y sus Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Madera. México: Gobierno del Distrito Federal; 2004.

