



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2016”

Multidisciplinario

21 y 22 de abril de 2016, Cortazar, Guanajuato, México

Anisotropía del módulo de elasticidad de la madera de tres pinos mexicanos.

Javier Ramón Sotomayor Castellanos

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

madera999@yahoo.com

Resumen

El carácter anisotrópico de la madera le confiere versatilidad para el diseño de productos y estructuras de madera. El objetivo de esta investigación fue determinar el módulo de elasticidad en las direcciones radial, tangencial y longitudinal, de madera de *P. michoacana*, *P. douglasiana* y *P. pringlei*. Se realizaron ensayos de compresión en 39 probetas y se determinó su contenido de humedad y su densidad básica. Para cada una de las especies, los resultados del análisis de varianza entre las direcciones radial, tangencial y longitudinal del módulo de elasticidad, indicaron una diferencia significativa entre las medias de los valores de las tres direcciones. Estos resultados confirman que las propiedades elásticas de la madera varían según la dirección en que se miden, verificando el carácter anisotrópico del material.

Palabras clave: densidad, direcciones radial, tangencial y longitudinal.

Abstract



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2016”

Multidisciplinario

21 y 22 de abril de 2016, Cortazar, Guanajuato, México

The anisotropy feature of wood confers versatility for designing products and wood structures. The objective of this research was to determine the modulus of on the radial, tangential and longitudinal directions, for *P. Michoacana*, *P. pringlei* and *P. douglasiana* wood. Compression tests were performed on 39 specimens and wood moisture content and basic density were calculated. For each of the species studied, results of analysis of variance between radial, tangential and longitudinal directions of modulus of elasticity, suggest a significant difference between the mean values of the three variables grouped into elastic and strength parameters. These results confirm that the elastic properties of wood vary according to the direction in which they were measured, verifying the anisotropy feature of the material.

Keywords: density, radial, tangential, and longitudinal direction.

I. Introducción

La magnitud del módulo de elasticidad de la madera, varía según las direcciones radial, tangencial y longitudinal, debido a que la madera es un material anisotrópico. El conocimiento del módulo de elasticidad en estas direcciones es útil para el diseño basado en la confiabilidad estructural (Dávalos Sotelo, 1996), para diseñar y calcular estructuras (Comisión Forestal de América del Norte, 1994) y permite aplicar el método de los elementos finitos (Mackerle, 2005; Vasic, Smith y Landis, 2005).

En México existe información sobre las características mecánicas de las maderas que se analizan en el presente trabajo. Sotomayor-Castellanos (2005) indica



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2016”

Multidisciplinario

21 y 22 de abril de 2016, Cortazar, Guanajuato, México

valores de resistencia mecánica y elástica; Sotomayor-Castellanos, Guridi-Gómez y García-Moreno (2010) determinan módulos de elasticidad por ultrasonido y Sotomayor-Castellanos, García-Mariscal, Moya-Lara y Olguín-Cerón (2010) calculan los valores en las direcciones radial, tangencial y longitudinal de las velocidades del ultrasonido y de los módulos de elasticidad dinámicos. De la revisión de los trabajos anteriores, se detectó que las características derivadas de ensayos en compresión son inexistentes para las especies de *P. michoacana*, *P. douglasiana* y *P. pringlei*.

El objetivo de esta investigación fue determinar el módulo de elasticidad, en las direcciones radial, tangencial y longitudinal, para madera de *P. michoacana*, *P. douglasiana* y *P. pringlei*.

II. Metodología

El material experimental consistió en madera de *Pinus michoacana* var. *cornuta* Martínez, *Pinus douglasiana* Martínez y *Pinus pringlei* Shaw. Se prepararon 39 probetas de 50 x 50 x 50 mm orientadas en las direcciones radial (r), tangencial (t) y longitudinal (l). Las probetas conteniendo solamente madera de albura y libres de nudos, fibra desviada y madera de reacción, fueron almacenadas durante un año en una cámara de acondicionamiento con una temperatura de 20 °C y con una humedad relativa del aire de 60 %, hasta lograr un contenido de humedad uniforme.

Para cada probeta, se determinó el contenido de humedad al momento del ensayo y la densidad básica de acuerdo a Haygreen y Bowyer (1996).

“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2016”

Multidisciplinario

21 y 22 de abril de 2016, Cortazar, Guanajuato, México

Los ensayos de compresión consistieron en aplicar una carga en las direcciones radial, tangencial y longitudinal, a tres grupos de trece probetas de cada especie (Figura 1). Para aplicar la carga en compresión a las probetas, se empleó una maquina universal de pruebas mecánicas *Tinius Olsen*® y se capturó la carga aplicada (P en N) y su desplazamiento (Δx en m) en la dirección x (Figura 1) correspondiente a las direcciones de observación r , t , l . A partir de estas mediciones, se calcularon el esfuerzo en el área de la sección transversal (bh , en m^2) a la dirección de la carga ($\sigma = P/bh$, en Pa) y la deformación correspondiente ($\epsilon = \Delta x/x$, en m/m), y se prepararon los diagramas esfuerzo-deformación para cada probeta de acuerdo a las tres direcciones observadas (Figura 2).

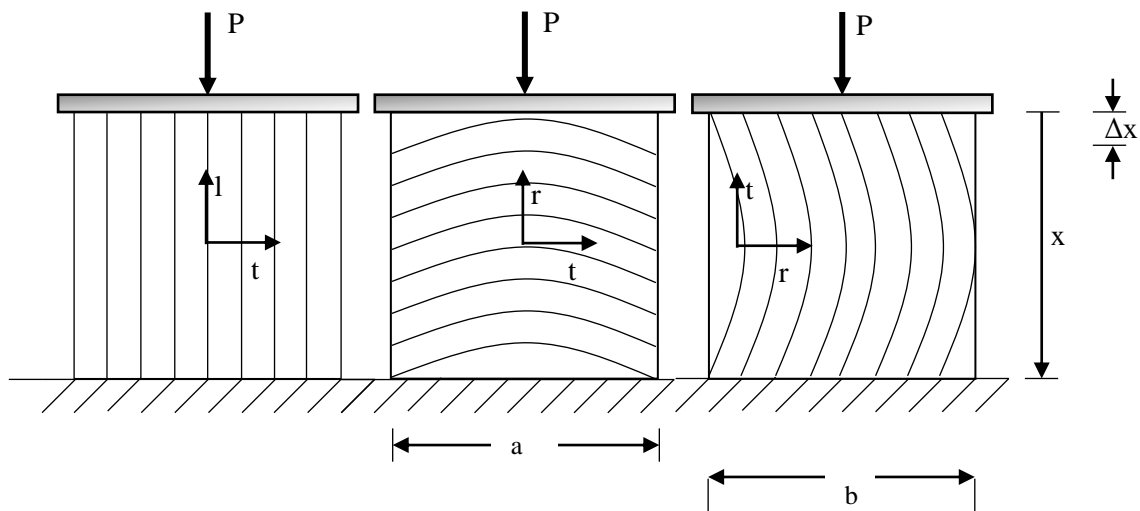


Figura 1. Orientación de las probetas en las pruebas de compresión. P : Carga; x : Dirección de la carga; Δx : Desplazamiento de la carga en la dirección x ; r : Dirección radial; t : Dirección tangencial; l : Dirección longitudinal; a : Altura de la probeta; b : Base de la probeta.



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2016”

Multidisciplinario

21 y 22 de abril de 2016, Cortazar, Guanajuato, México

El módulo de elasticidad se calculó en el dominio lineal del diagrama esfuerzo-deformación (Figura 5), con la fórmula:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}$$

Donde:

E = Módulo de elasticidad (Pa)

$\Delta\sigma$ = Intervalo de esfuerzo en el dominio lineal (Pa)

$\Delta\varepsilon$ = Intervalo de deformación en el dominio lineal (m/m)

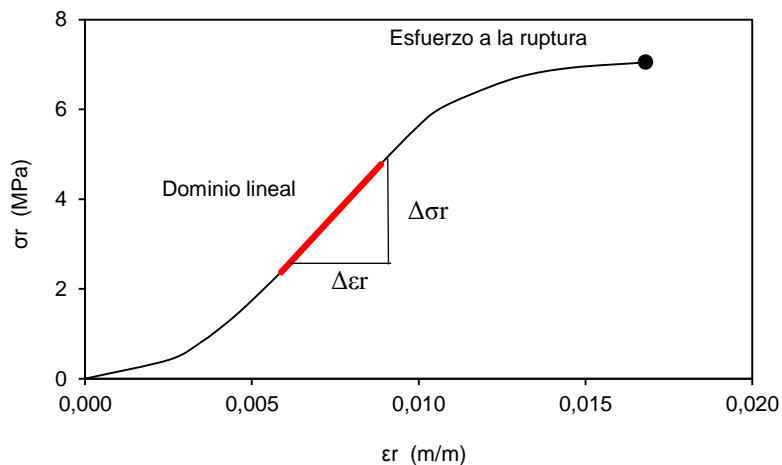


Figura 2. Diagramas esfuerzo-deformación en la dirección radial para *P. pringlei*.

III. Resultados

La Tabla 1 presenta los resultados de las pruebas de compresión en las direcciones radial, tangencial y longitudinal para la madera de *P. michoacana*, *P. douglasiana* y *P. pringlei*. Incluye además los estadígrafos de la densidad básica y del contenido de humedad de la madera.



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2016”

Multidisciplinario

21 y 22 de abril de 2016, Cortazar, Guanajuato, México

Para cada especie, el análisis de varianza ANOVA entre las direcciones radial, tangencial y longitudinal del módulo de elasticidad, concluyeron que existe diferencia significativa, con un nivel de confianza del 95 %, entre las medias de los valores de las 3 variables. Este resultado confirma que las características mecánicas de la madera de *P. michoacana*, *P. douglasiana* y de *P. pringlei* varían según la dirección en que sean determinadas.

Tabla 1. Resultados de las pruebas de compresión.

	Dirección radial			Dirección tangencial			Dirección longitudinal		
	ρ_0 kg/m ³	CH %	Er MPa	ρ_0 kg/m ³	CH %	Et MPa	ρ_0 kg/m ³	CH %	EI MPa
<i>Pinus michoacana</i>									
x	369	10,36	489	371	10,42	289	367	10,30	2 199
σ	12,81	0,12	103	17,99	0,12	29,14	11,24	0,14	307
CV	0,03	0,01	0,21	0,05	0,01	0,10	0,03	0,01	0,14
<i>Pinus douglasiana</i>									
x	377	10,35	386	369	10,60	296	355	10,39	1 597
σ	5,00	0,72	66	14,80	0,21	30,96	4,03	0,18	123,82
CV	0,01	0,07	0,17	0,04	0,02	0,10	0,01	0,02	0,08
<i>Pinus pringlei</i>									
x	460	10,52	649	451	10,71	419	496	10,70	3 206
σ	21,36	0,13	106	15,09	0,11	128	24,22	0,11	817
CV	0,05	0,01	0,16	0,03	0,01	0,31	0,05	0,01	0,26

ρ_0 : Densidad básica; CH: Contenido de humedad; E: Módulo de elasticidad en compresión; r:

Dirección radial; t: Dirección tangencial; l: Dirección longitudinal;

x: Media aritmética; σ : Desviación estándar; CV: Coeficiente de variación.



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2016”

Multidisciplinario

21 y 22 de abril de 2016, Cortazar, Guanajuato, México

La densidad básica de la madera de *P. michoacana*, *P. douglasiana* y de *P. pringlei* fue similar a la reportada para las mismas especies por Sotomayor-Castellanos *et al.* (2010). Los resultados de ANOVA mostraron que existe diferencia significativa entre las medias de la densidad básica de las tres especies. Los coeficientes de variación se sitúan en el rango encontrado para las maderas mexicanas con densidad similar del género *Pinus* reportadas por Silva (2008). De acuerdo a FITECMA (Sotomayor-Castellanos, 2008), las maderas de *P. michoacana* y de *P. douglasiana* se clasifican como de densidad media, y la madera de *P. pringlei* como de densidad alta.

El módulo de elasticidad varió según la dirección de anisotropía en la que se determinó. En la dirección longitudinal, este parámetro fue mayor en comparación con los de las direcciones radial y tangencial, en una proporción de anisotropía que va desde 4,50 hasta 7,30 (Figura 3). Las probetas de *P. michoacana* y *P. pringlei* mostraron valores similares entre sí, mientras que las de *P. douglasiana* fueron en promedio 60 % mayores con respecto a las de *P. michoacana* y *P. pringlei*.

Franke y Quenneville (2010), empleando probetas de *Pinus radiata* en forma de cubo y orientadas en direcciones similares a las de esta investigación, encontraron valores del módulo de elasticidad de: $E_t = 288$ MPa, $E_r = 515$ MPa y $E_l = 5\,430$ MPa, con densidad de 470 kg/m^3 y CH de 12 %, resultados que son cercanos a los de esta investigación

El módulo de elasticidad fue proporcional a la densidad básica de la madera para las tres especies y en las tres direcciones, con excepción de la dirección



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2016”

Multidisciplinario

21 y 22 de abril de 2016, Cortazar, Guanajuato, México

tangencial de *P. douglasiana*, que mostró un valor mayor al correspondiente, resultados que coinciden con los de Ellis y Steiner (2002), quienes estudiaron en compresión probetas cubicas de 25.4 mm de arista, de cinco maderas mexicanas con densidades que van de 323 kg/m³ hasta 979 kg/m³.

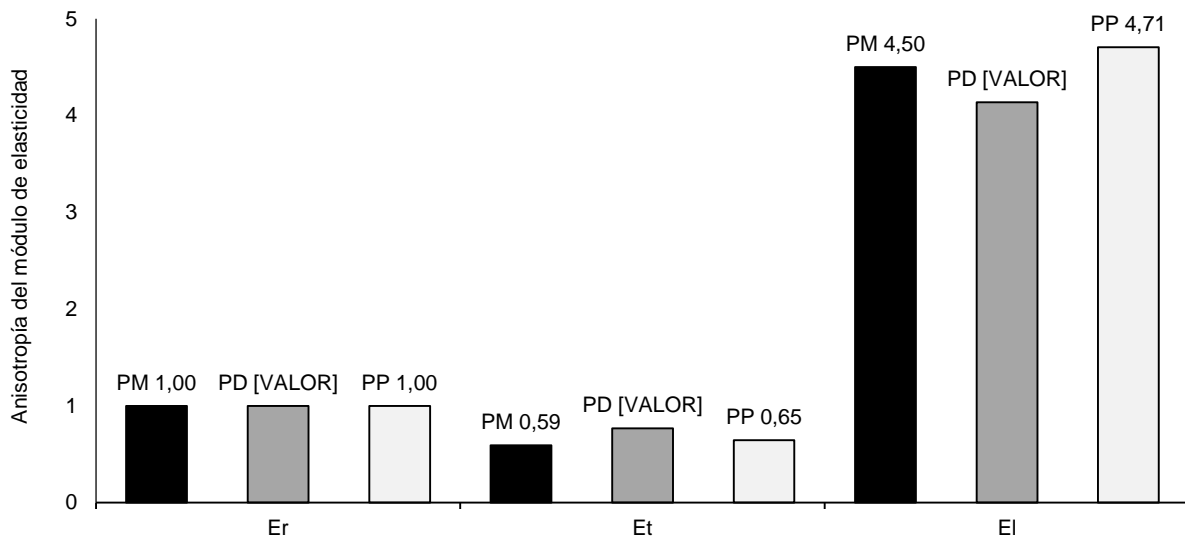


Figura 3. Anisotropía de la madera. E: Módulo de elasticidad en compresión; r: Dirección radial; t: Dirección tangencial; l: Dirección longitudinal; PM: *P. michoacana*; PD: *P. douglasiana*; PP: *P. pringlei*.

IV. Conclusiones

Los módulos de elasticidad son diferentes en las direcciones radial, tangencial y longitudinal de la madera, confirmando el carácter anisotrópico de la madera. Este comportamiento se observa en las tres especies.



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2016”

Multidisciplinario

21 y 22 de abril de 2016, Cortazar, Guanajuato, México

Para la madera de *P. michoacana*, *P. douglasiana* y *P. pringlei*, el valor promedio del módulo de elasticidad en compresión en la dirección radial es mayor que el del módulo de elasticidad en la dirección tangencial. Ambos parámetros son menores que el del módulo de elasticidad longitudinal. El *P. pringlei* presenta valores mayores del módulo de elasticidad en comparación con los de *P. michoacana*, *P. douglasiana*.

V. Bibliografía.

Comisión Forestal de América del Norte. (1994). *Manual de construcción de estructuras ligeras de madera*. México: Consejo Nacional de la Madera en la Construcción.

Dávalos Sotelo, R. (1996). Diseño probabilístico de estructuras de madera en Norteamérica, *Madera y Bosques*, 2(1):9-31.

Ellis, S., Steiner, P. (2002). The behaviour of five wood species in compression, *IAWA Journal*, 2 (2): 201-211.

Franke, S., Quenneville, P. (2010). The Material Behaviour of Radiata Pine under Compression, *New Zealand Timber Design Journal*, 18(3):13-18.

Haygreen, J.G., Bowyer, J.L. (1996). *Forest Products and Wood Science*. An Introduction. USA: Iowa State University Press.



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2016”

Multidisciplinario

21 y 22 de abril de 2016, Cortazar, Guanajuato, México

Mackerle, J. (2005). Finite element analyses in wood research: a bibliography, *Wood Science and Technology*, 39:579-600.

Silva Guzmán, J.A. (2008). *Fichas técnicas sobre características tecnológicas y usos de maderas comercializadas en México*. Tomo I. México: Comisión Nacional Forestal.

Sotomayor-Castellanos, J.R. (2008). TABLA FITECMA de clasificación de características mecánicas de maderas mexicanas. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Coordinación de la Investigación Científica. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México. 1 p. Recuperado de: <https://umich-mx.academia.edu/JavierRam%C3%B3nSotomayorCastellanos>.

Sotomayor-Castellanos, J.R. (2005). Características mecánicas y clasificación de la madera de 150 especies de maderas mexicanas, *Investigación e Ingeniería de la Madera*, 1(1):3-20.

Sotomayor-Castellanos, J.R., Guridi-Gómez, L.I., García-Moreno, T. (2010). 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*, 4(1):3-32.

Sotomayor-Castellanos, J.R., García-Mariscal, J.L., Moya-Lara, C.E., Olguín-Cerón, J.B. (2010). Higriscopía y anisotropía de la madera de *Pinus michoacana*, *Pinus douglasiana* y *Pinus pringlei*. Higrcontracción, velocidad del ultrasonido y



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2016”

Multidisciplinario

21 y 22 de abril de 2016, Cortazar, Guanajuato, México

módulo de elasticidad dinámico, *Investigación e Ingeniería de la Madera*, 6(3):3-32.

Vasic, S., Smith, I., Landis, E. (2005). Finite element techniques and models for wood fracture mechanics, *Wood Science and Technology*, 39:3-17.