



EVALUACIÓN DE MEDIDORES DE DESPLAZAMIENTO EN LA DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES ELÁSTICAS DE MADERA BRASILEÑA

EVALUATION OF METERS DISPLACEMENT IN THE DETERMINATION OF ELASTIC PROPERTIES OF BRAZILIAN WOOD

Costa Alves, Rejane¹; Vladimiro Mantilla Carrasco, Edgar²

¹Universidade Federal do Espírito Santo, Brazil;

²Universidade Federal de Minas Gerais, Brazil

CÓDIGO: F1-4620252

Resumen

La madera es un material ortotrópico, y consta de tres módulos de elasticidad, tres módulos de transversal y seis coeficientes de Poisson. Las constantes elásticas se determinaron a partir de pruebas de compresión siguiendo los requisitos de NBR 7190/97, utilizando el medidor de tensión portátil. Los especímenes fueron preparados con la orientación de las fibras en seis direcciones: las tres principales, radial, tangencial y longitudinal; y los tres intermedios, longitudinal-radial, longitudinaltangencial y radial-tangencial. Las especies utilizadas fueron: *Dinizia excelsa*, *Apuleia leiocarpa* y *Peltogyne decolor*. Los resultados permitieron concluir que la prueba de compresión con el medidor de desplazamiento portátil pudo determinar los valores de los módulos elásticos longitudinales (E), los módulos elásticos transversales (G) y los coeficientes de Poisson. Que la base utilizada para fabricar el medidor portátil se puede ampliar mediante estudios adicionales.

Palabras-clave: Ensayos no destructivos, madera, propiedades elásticas, caracterización mecánica.

Abstract

The wood is an orthotropic material, and consists of three modules of elasticity, three modules of transversal and six coefficients of Poisson. The elastic constants were determined from compression tests following the requirements of NBR 7190/97, using the portable strain gauge. The specimens were prepared with the orientation of the fibers in six directions: the three main ones, radial, tangential and longitudinal; and the three intermediates, longitudinal-radial, longitudinal-tangential and radial-tangential. The species used were: *Dinizia excelsa*, *Apuleia leiocarpa*, and *Peltogyne discolor*. The results allowed to conclude that the compression test using the portable displacement meter was able to determine the values of the longitudinal elastic moduli (E), the transversal elastic moduli (G) and the Poisson coefficients. That the foundation used to manufacture the portable meter can be expanded by further studies.

Keywords: Non-destructive tests, wood, elastic properties, mechanical characterization.



1. INTRODUCCIÓN

El análisis de rendimiento de cualquier componente estructural requiere el conocimiento de las propiedades elásticas de su material constituyente. En el caso de la madera, como para todos los materiales ortotrópicos, no es una tarea simple determinar las verdaderas relaciones tensión-deformación, incluidas las tensiones de tracción [MORAIS, 2000]. Muchos criterios de resistencia que existen presentan restricciones en materiales heterogéneos y anisotrópicos, con propiedades de elasticidad direccional y resistencia, como la madera [NICOLAS y MASCIA, 2009]. Por lo tanto, para caracterizar el comportamiento mecánico de la madera es necesario conocer sus relaciones de tensión-deformación en el referencial LRT (longitudinal, radial, tangencial), a través de pruebas mecánicas utilizando extensómetros [MORAIS, 2000].

Las primeras pruebas para analizar la relación entre la carga y el esfuerzo, o la deformación en la madera, fueron realizadas por Galileo en 1638 y Hooke en 1678 [BALLARIN y NOGUEIRA, 2003]. Sliker (1972) ya describió en su trabajo que la determinación de los valores del coeficiente de Poisson de los bosques ya estaba siendo estudiada por Doyle et al. en 1945

Mascia y Nicolas (2013) determinaron el coeficiente de Poisson de la especie de madera tropical *Goupia glabra*, mediante una prueba de compresión utilizando galgas extensométricas eléctricas. Los autores compararon este ensayo con un modelo teórico rectilíneo elástico, y las diferencias entre los valores medios teóricos y experimentales estuvieron en el rango de 2-15%, excepto para un ángulo de 75 ° para el plano LT y para el ángulo de 90 ° para ambos planos.

Mascia (1991) determinó los valores del coeficiente de Poisson para cuatro especies forestales, entre ellas Guapuruvu (*Schizolobium parahyba*), Ipê (*Tabebuia* sp), Angico (*Piptadenia excelso*) y Pinus (*Pinus Caribaea* var. *Bahamensis*).

Bolza y Kloot (1963) afirman que las propiedades elásticas se describen mediante tres constantes: el módulo elástico longitudinal (E), el módulo elástico transversal (G) y la relación de Poisson (ν). Como la madera es un material ortotrópico, las propiedades de elasticidad varían según la dirección de las fibras en relación con la dirección de aplicación de la fuerza. La norma brasileña, NBR 7190 (1997), no proporciona ninguna especificación con respecto a los valores del coeficiente de Poisson para la madera y solo presenta la relación $G = E / 20$.

Para este tipo de investigación, la mayoría de las veces, se utilizan galgas extensométricas pegadas a las PC para determinar las propiedades elásticas de la madera. Sin embargo, su uso genera un alto costo y mucho tiempo, por lo que el objetivo de este trabajo es desarrollar un medidor de desplazamiento portátil para estimar las propiedades elásticas de la madera.

2 METODOLOGÍA

Las pruebas se realizaron en el Centro de Investigación Avanzada en Madera y Nuevos Materiales (CPAM), Universidad Federal de Minas Gerais (UFMG). Las maderas probadas fueron angelim rojo (*Dinizia excelsa*), con seis muestras, una para cada una de las seis direcciones analizadas. Los CP utilizados para las pruebas también se utilizaron



para determinar el contenido de humedad, la densidad aparente y la matriz constante elástica completa mediante pruebas de compresión. Los procedimientos de prueba para la determinación de las características mecánicas siguieron los requisitos de NBR 7190 (1997), así como los estrictos estándares de requisitos y procedimientos del sistema de calidad implementados en los laboratorios del Centro de Investigación de Madera y Materiales Nuevos (CPAM).

Para la determinación de las constantes elásticas por prueba de compresión, se utilizaron medidores de desplazamiento portátiles (MD). En la Figura 1 es posible observar los MD instalados en una PC que fue probada para compresión. En el frente se detalla la fabricación y operación del MD.



Figura 1: esquema de carga de CP de compresión.

Con la composición de algunos medidores de desplazamiento (MD), se determinaron las deformaciones en varias direcciones, así como la distorsión de corte. La siguiente es una descripción de los esquemas de grupo MD utilizados, así como la formulación para determinar las deformaciones.

La deformación en la dirección x es:

$$\varepsilon_x = \frac{\delta x}{x}, \quad (1)$$

Con las ecuaciones (2), se pueden determinar ε_x , ε_y e γ_{xy} . Si es necesario determinar las deformaciones en otras direcciones a partir de las deformaciones en las direcciones x e y, la transformación de tracción de los componentes de deformación viene dada por:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon'_x \\ \varepsilon'_y \\ \gamma'_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos^2 \varphi & \text{sen} \varphi \cos \varphi & \text{sen}^2 \varphi \\ \text{sen}^2 \varphi & -\text{sen} \varphi \cos \varphi & \cos^2 \varphi \\ -\cos \varphi \text{sen} \varphi & (\cos^2 \varphi - \text{sen}^2 \varphi) & 2 \text{sen} \varphi \cos \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} \quad (12)$$



Teniendo en cuenta los ángulos de inclinación con respecto al eje X son: $\varphi_1 = 0^\circ$, $\varphi_2 = \theta$ e $\varphi_3 = 90^\circ$.

Resolviendo para ε_x , ε_y e γ_{xy} , incluso tener:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \varepsilon_1 \\ \varepsilon_y &= \varepsilon_3 \\ \gamma_{xy} &= \frac{2\varepsilon_2 - (\varepsilon_1 + \varepsilon_3) - (\varepsilon_1 + \varepsilon_3)\cos 2\theta}{\sin 2\theta} \quad \text{ou} \quad \gamma_{xy} = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1 \cos^2 \theta - \varepsilon_3 \sin^2 \theta}{\sin \theta \cos \theta} \end{aligned} \quad (3)$$

Considerando que solo se aplica el voltaje σ_y , es decir, los otros voltajes son iguales a cero, sustituyendo estas tensiones en la ecuación ($\varepsilon_{ij} = S_{ijkl} \cdot \sigma_{kl}$), tenemos:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \varepsilon_1 = -\frac{v_{yx}}{E_y} \sigma_y \\ \varepsilon_y &= \varepsilon_3 = \frac{\sigma_y}{E_y} \\ \gamma_{xy} &= 0 \\ \varepsilon_2 &= \varepsilon_1 \cos^2 \theta + \varepsilon_3 \sin^2 \theta \end{aligned} \quad (4)$$

Assim:

$$E_y = \frac{\sigma_y}{\varepsilon_3} \quad (5)$$

$$\frac{E_y}{v_{yx}} = -\frac{\sigma_y}{\varepsilon_1} \quad (6)$$

on las transformaciones de tensión de los componentes de tensión y deformación tenemos:

$$\begin{aligned} \gamma_\theta &= 2(\varepsilon_x - \varepsilon_y) \sin \theta \cos \theta + \gamma_{xy} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \\ \tau_\theta &= \tau_{xy} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) + (\sigma_y - \sigma_x) \sin \theta \cos \theta \end{aligned}$$

E com

$$G_\theta = \frac{\tau_\theta}{\gamma_\theta}$$

tem-se:

$$G_\theta = \frac{\sigma_y}{2(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)} \quad (7)$$

Usando las transformaciones de tensión de las constantes de tensión, deformación y elasticidad, dadas por Lekhnitskii (1991), es posible obtener la constante de G_{xy} .

Mirando las ecuaciones 5, 6 y 7, se concluye que solo se requieren dos MD. La Figura 2 muestra la ubicación de los MD. Se utilizan seis MD, dos en la dirección de la fuerza aplicada (una en cada cara opuesta) y cuatro perpendiculares a la fuerza aplicada, con una en cada cara.

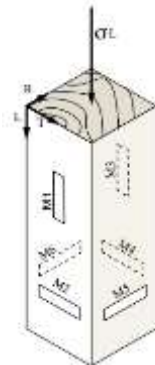


Figura 2: Posición de los seis medidores de desplazamiento.

Ahora, aplicando los esfuerzos en las direcciones radial (R), CP-II y tangencial (T), CP-III por separado, y siguiendo un razonamiento análogo, se establecen las otras constantes elásticas. Además, utilizando las ecuaciones presentadas por Lekhnitskii (1991), obtenemos los módulos de deformación transversal, Ecuación 8 (Método 2):

$$\frac{1}{G'_{LR}} = 4 \left(\frac{1}{E_L} + \frac{1}{E_R} + \frac{\nu_{LR}}{E_L} - \frac{1}{G_{LR}} \right) \text{sen}^2\theta \text{cos}^2\theta + \frac{1}{G_{LR}} \quad (8)$$

$$\frac{1}{G'_{RT}} = \frac{\text{cos}^2\theta}{G_{RT}} + \frac{\text{sen}^2\theta}{G_{LT}}$$

$$\frac{1}{G'_{LT}} = \frac{\text{sen}^2\theta}{G_{RT}} + \frac{\text{cos}^2\theta}{G_{LT}}$$

Los módulos de deformación transversal también se pueden determinar a través de los PLC orientados al plano: LT, PLC tipo IV (PLC-IV); LR, CP Tipo V (CP-V) y RT, CP Tipo VI (CP-VI). Con estos CP resulta la $E_{\alpha\alpha}$ que corresponde a la E en cada plano. Usando las ecuaciones determinadas por Mascia (1991), obtenemos todos los módulos de deformación transversal, Ecuación 9.

$$\frac{1}{G_{LT}} = \frac{1}{E_{\alpha}(\text{sen}^2\alpha \text{cos}^2\alpha)} - \frac{\text{cos}^4\alpha}{E_T(\text{sen}^2\alpha \text{cos}^2\alpha)} + \frac{\text{sen}^4\alpha}{E_L(\text{sen}^2\alpha \text{cos}^2\alpha)} + \frac{2\nu_{LT}}{E_L},$$

$$\frac{1}{G_{LR}} = \frac{1}{E_{\alpha}(\text{sen}^2\alpha \text{cos}^2\alpha)} - \frac{\text{cos}^4\alpha}{E_R(\text{sen}^2\alpha \text{cos}^2\alpha)} + \frac{\text{sen}^4\alpha}{E_L(\text{sen}^2\alpha \text{cos}^2\alpha)} + \frac{2\nu_{LR}}{E_L},$$

(9)

$$\frac{1}{G_{TR}} = \frac{1}{E_{\alpha}(\text{sen}^2\alpha \text{cos}^2\alpha)} - \frac{\text{cos}^4\alpha}{E_R(\text{sen}^2\alpha \text{cos}^2\alpha)} + \frac{\text{sen}^4\alpha}{E_T(\text{sen}^2\alpha \text{cos}^2\alpha)} + \frac{2\nu_{TR}}{E_T},$$



3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

A partir de la pendiente de la línea de tensión y la deformación longitudinal (Fig. 3 (A)), se determinó el valor del módulo de elasticidad longitudinal a las fibras; 10400MPa para madera roja angelim. Comparando este valor con el valor promedio (15027MPa), se puede concluir que, aunque un poco más bajo, el medidor de desplazamiento portátil pudo capturar eficientemente la deformación longitudinal en la PC.

La figura 3 (B) muestra el valor de G_{LT} , determinado a partir de la pendiente de la línea entre la tensión y la relación propuesta por Carrasco (1989). El valor encontrado fue de 850 MPa. Autores como Vázquez et al. (2015) encontraron valores de 822 MPa para madera de castaño. Gonçalves y col. (2011) encontraron valores de: 1489 MPa para madera de garapa; 892 MPa para cupiuba y 1172 MPa para eucalipto salado. Los diferentes valores están justificados por la heterogeneidad de los bosques.

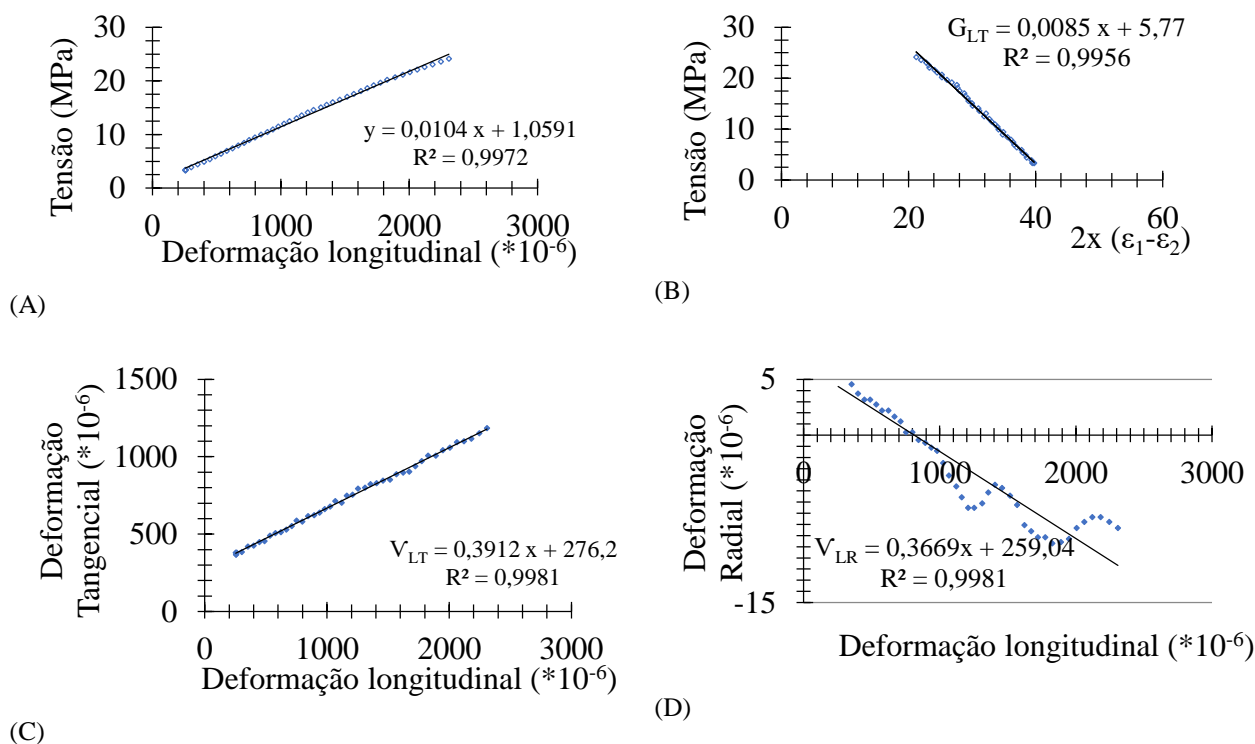


Figura 3: Ejemplo de los resultados de la prueba de compresión de madera angelim roja usando el medidor portátil. (A) Módulo de elasticidad longitudinal. (B) Módulo transversal de elasticidad. (C) Razón de Poisson longitudinal tangencial. (D) Razón radial de Poisson longitudinal.

La Figura 4 muestra la relación entre los dos métodos, el convencional y el propuesto mediante el uso del medidor de desplazamiento portátil; esto en las tres direcciones principales y para tres especies: garapa (G); púrpura (R) y rojo angelim (AV). En base a la regresión, es posible afirmar que existe una relación entre los métodos de $R^2 = 93\%$,



dejando en claro que este método puede estimar con precisión el valor del módulo estático para las tres direcciones propuestas.

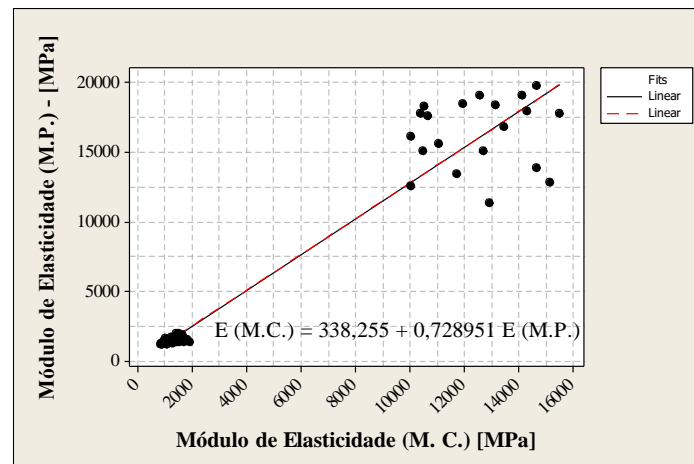


Figura 4: Relación entre el método convencional (M.C) y el método propuesto (M.P) para estimar el módulo elástico.

CONCLUSIONES

A partir del desarrollo del medidor de desplazamiento portátil, fue posible caracterizar las constantes elásticas de las maderas brasileñas utilizando la prueba de compresión. Por lo tanto, se puede concluir que es un método no destructivo que genera ahorro de tiempo, apoyo financiero y, sobre todo, una innovación en el área.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero de la Fundación de Apoyo a la Investigación e Innovación Espírito Santo (FAPES) y el Consejo Nacional para el Desarrollo Científico y Tecnológico (CNPq) y la Coordinación para el Mejoramiento del Personal de Educación Superior (CAPES).

REFERENCIAS

ASOCIACIÓN BRASILEÑA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 7190: Diseño de estructuras de madera. Río de Janeiro, 1997.

Ballarin, A. W. ; Nogueira, M. Caracterización elástica de madera de eucalipto citriodora. CERNE (UFL), Lavras, v. 09, nº 1, pág. 69-83, 2003.

Bolza, E. ; Kloot, N. M. Las propiedades mecánicas de 174 maderas australianas. Div. Para. Prod. CSIRO Melbourne Tech. Papel no 25. 1963.

Bucur, V. Acústica de madera. 2. ed. Nueva York: CRC Press, 2006. v. 1.399p.



Carrasco, E. V. M. Resistencia, elasticidad y distribución de tensiones en las vigas rectas de madera laminada encolada. 1989. 120 f. Tesis (Doctorado en Ingeniería Estructural) - Escuela de Ingeniería de São Carlos, São Carlos, 1989.

Gonçalves, R; Trinca, A. J. ; Cerri, D. G. Comparación de constantes elásticas de madera determinadas por propagación de ondas ultrasónicas y prueba de compresión estática. Wood and Fiber Science, v. 43, p. 64-75, 2011.

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA DEL ESTADO DE SÃO PAULO - Fichas técnicas de IPT de maderas brasileñas. 2da ed. Sao Paulo: IPT, 1989a. 418p.

Lekhnitskii, J. Teoría de la elasticidad de un cuerpo anisotrópico, Moscú, Mair. Pleblishers, 1981.

Lg Acero. Acero al carbono medio y alto - F - 436-1045 acero / temp. 38/45 hrc. 2015. Disponible en: <http://lgsteel.com.br/arruela-lisa-em-aco-medio-alto-carbonolg-436-aco.htm>. Acceso el 6/2/2015.

Mascia, N. T. Con respecto a la anisotropía de la madera (Consideraciones sobre la anisotropía en la madera). Tesis doctoral, Escuela de Ingeniería de São Carlos - USP, Brasil (en portugués); 1991

Mascia, N.T. ; Nicolas, E. A .. La determinación de Poisson son proporciones en relación con el ángulo de fibra de una especie de madera tropical. Construcción y materiales de construcción, v. 41, p. 691-696, 2013.

Morais, J. J. Comportamiento mecánico no lineal de la madera. ICETA / UTAD. Universidad de Trás os Montes y Alto Douro.2000.

Nicolás, E. A. ; Mascia, N. T. ; Todeschini, R. Pruebas uniaxiales y biaxiales para la evaluación del criterio de resistencia (Tsai-Wu) de materiales anisotrópicos para madera. Revista Minerva, v. 6, p. 107-116, 2009.

Sliker, A. Medición de las relaciones de Poisson en madera. Mecánica Experimental 12 (5), 1972: 239-42.

Vázquez, C.; Gonçalves, R. ; Bertoldo, C.; Baño, V. ; Ver A; Crespo, J.; Guaita, M. Determinación de las propiedades mecánicas de Castanea sativaMill. utilizando propagación de ondas ultrasónicas y comparación con compresión estática y métodos de flexión. Wood Sci Technol, 2015.