

## **MÓDULOS DE ELASTICIDAD DINÁMICOS COMO PREDICTORES DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO**

**Luis Acuña<sup>1</sup>, Mercedes Carretero<sup>1</sup>, Milagros Casado<sup>1</sup>, Eleana Spavento<sup>2</sup>**

1 - Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal, Universidad de Valladolid, España

2 - Cátedra de Xilotecología, Universidad Nacional de La Plata, Argentina

### **Resumen**

Sobre una muestra de 23 vigas de madera de *Populus x euramericana* I-214, clase visual ME1, se ha determinado el módulo de elasticidad estático, aplicando una carga central, y los módulos de elasticidad dinámicos mediante: vibración armónica, vibración transversal inducida por impacto y velocidad del paso de onda ultrasónica. Los resultados obtenidos muestran que no se encuentran diferencias significativas entre los valores medios de los diferentes módulos de elasticidad. Por otra parte, se observan unas muy fuertes correlaciones,  $R^2$  ajustado  $\approx 90\%$ , entre los módulos de elasticidad dinámicos y el estático, pudiendo concluirse que los primeros se pueden utilizar como predictores del módulo estático con plena garantía.

**Palabras clave:** *Populus x euramericana*, Módulo de elasticidad, vibraciones inducidas.

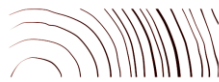
### **Introducción**

La madera a lo largo de la historia, ha estado íntimamente ligada con el hombre convirtiéndose en uno de los materiales más empleados por este. Este material ha tenido diversos usos, entre las que podemos destacar el uso como arma, herramienta, combustible y elemento constructivo.

Este último uso se remonta hasta la época prehistórica, utilizándose para elaborar los refugios. Estas estructuras o elementos constructivos fueron evolucionando durante los siglos hasta la actualidad, pasando de unas simples estructuras autosoportadas a tipologías complejas. Existen varios motivos por los que el hombre ha utilizado esta materia prima en la construcción, los principales son:

- Buen comportamiento físico-mecánico, ya que proporciona una excelente relación resistencia/peso, siendo superior a la del acero y el hormigón.
- Fácil de trabajar.
- Material renovable, requiriendo poco gasto energético para su fabricación, transporte y puesta en obra.

Atendiendo a las propiedades físico-mecánicas, la madera es un material elástico, para poder medir esa rigidez o flexibilidad del material se pueden utilizar diversos métodos. El más importante, por estar normalizado, consiste en someter a la pieza de madera a una carga progresiva, dentro del límite elástico, y determinando cuánto se deforma en cada momento. Si bien este método es uno de los más fiables y precisos implica, bien la destrucción del material si se pretende determinar finalmente su resistencia a rotura, bien la necesidad de disponer de un equipo suficientemente sofisticado y caro (máquina de ensayo).



En las últimas décadas han aparecido distintos métodos no destructivos (NDT- Nondestructive Testing) para medir las características mecánicas de la madera que permiten examinar los materiales sin que se vea afectada su integridad, propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales (ROSS AND PELLERIN, 1994). Los métodos NDT se pueden utilizar para detectar, localizar, medir y evaluar defectos, para determinar propiedades de los materiales, su composición o para garantizar su adecuado comportamiento en uso.

Entre las técnicas no destructivas aplicadas a la madera se encuentran aquellas que se basan en el uso de los ultrasonidos (ROSS et al., 1991; ROSS et al., 2005; DIVOS AND TANAKA, 2005; ACUÑA L. et al. 2006, BARADIT, et al., 2013), habiendo sido muchos los investigadores que han comprobado la eficacia del método de ultrasonidos para determinar las constantes elásticas de la madera, (BUCUR V. 1994; SANDOZ, J.L 1989, HERNÁNDEZ R. et al. 1998). La aplicabilidad del método reside en la fuerte relación existente entre las propiedades elastomecánicas del material (RAJESHWAR B. 1997) en particular el módulo de elasticidad, y la constante dinámica obtenida a partir de la velocidad de propagación de los ultrasonidos.

Las técnicas de vibraciones inducidas se engloban también dentro de los ensayos no destructivos que aplicadas a elementos de madera o derivados de la madera, permiten estimar sus propiedades físico-mecánicas, así como diagnosticar y asegurar su integridad estructural en obra, identificando componentes dañados o deteriorados, sin comprometer su funcionalidad. El desarrollo de dichas técnicas basados en el análisis vibracional se remonta a mediados del siglo pasado y es a comienzos de los años noventa cuando aparecen multitud de artículos científicos sobre este tema; Schad et al., (1995); Haines et al., (1996); Sánchez Beitia (2000); Burdzik and Nkwera (2002); Ilic (2003); Kisa (2004); Hu et al., (2005); Divos and Tanaka (2005); Casado et al., (2007); Casado et al., (2009); Divos and Sismandy Kiss (2010), Acuña (2011), entre otros muchos.

En los últimos años los métodos acústicos basados en las vibraciones inducidas han ido tomando mayor importancia para predecir y evaluar el comportamiento elástico de la madera y establecer rangos clasificatorios a partir de ellos (WANG et al., 2008; SEDIK et al., 2010; CASADO et al., 2012; WANG et al., 2012). En este sentido, la mayoría de los trabajos están encaminados a estimar el comportamiento de elementos de madera (o con base de madera) a partir de la frecuencia de vibración (longitudinal y transversal), estimando su módulo de elasticidad dinámico y analizando las relaciones entre dichos parámetros dinámicos y las variables elasto-resistentes estáticas: módulo de elasticidad estático y módulo de rotura (GOENS, 1931; HEARMON, 1958; HEARMON, 1966; MERHAR AND BUČAR, 2008; WANG et al., 2008; YU, 2009; SEDIK et al., 2010; KARLINASARI et al., 2012; HUNT et al., 2013). Las investigaciones se han centrado casi exclusivamente en el análisis vibracional sobre vigas simplemente apoyadas y con ambos extremos libres, concluyendo que las propiedades dinámicas se correlacionan suficientemente bien con las variables estáticas y, en menor medida, con el módulo de rotura, prediciendo de manera satisfactoria las características físicas y los parámetros de calidad de la madera. Así en lo referente a la aplicación de esta técnica en piezas en voladizo, no existen prácticamente trabajos que estudien el comportamiento de la madera, existiendo, sin embargo, un gran número de las investigaciones llevadas a cabo con diferentes materiales isótropos (GUGOZE AND BATÁN,

1986; JANG AND BERT, 1989; FARGHALY, 1992; AUCIELLO, 1996; BANERJEE, 1999; NEGAHBAN, 1999; DIGILOV, 2008; LEE, 2009; HUNT et al., 2013; ROOHNIA, 2014).

El objetivo planteado en este trabajo ha sido determinar el comportamiento elástico de piezas de madera, a través de la determinación del Módulo de elasticidad estático y dinámico, este último a partir de la velocidad de paso de una onda ultrasónica, su periodo de vibración armónica en voladizo y su frecuencia propia de vibración transversal en voladizo.

### Material y métodos

Para la elaboración de este estudio se ha contado con 23 vigas de *Populus x euroamericana* "I-214" procedente de Quintanilla de Sollamas. León. Con el fin de conocer sus dimensiones exactas se midió cada una de las vigas su longitud (L), anchura (a) y altura (h) utilizando el metro y el calibre con precisión de  $\pm 0,05$  mm. Además, se pesaron cada una de ellas con el fin de poder determinar su densidad. Los ensayos se realizaron con las piezas acondicionadas al 12% de humedad.

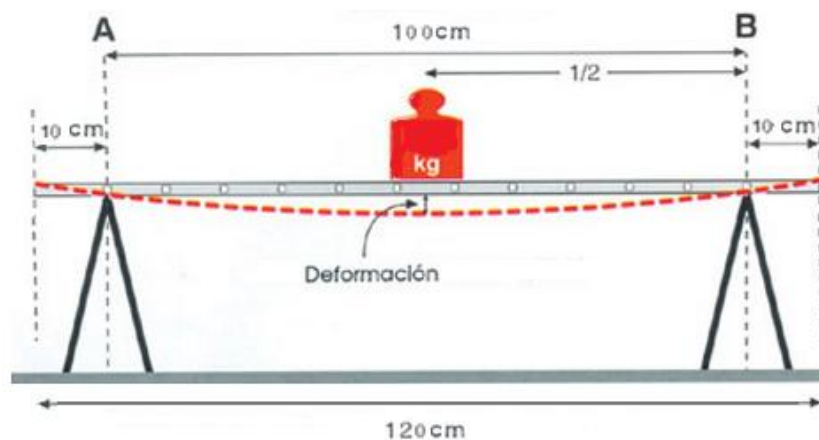
Se determinó el módulo de elasticidad dinámico a partir de los siguientes métodos:

- Periodo de vibración armónica en vigas empotradas.
- Frecuencia de vibración elástica en vigas empotradas.
- Onda ultrasónica.
- Escala de cargas en vigas biapoyadas.

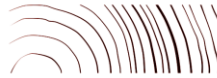
En cada uno de estos ensayos se realizaron tres repeticiones, obteniéndose tres valores de módulo de elasticidad por cada ensayo, obteniéndose un módulo de elasticidad medio por ensayo.

### Módulo de elasticidad estático en vigas biapoyadas mediante escala de cargas.

Este método consiste en la medición de la deformación de la viga de madera cuando es sometida a una carga central. El ensayo se realizó colocando la viga sobre dos apoyos separados 1 m, Figura 1. Los diferentes cargas se aplicaron en el centro de la viga midiéndose las deformaciones ocasionadas por cada una de ellas.



**Figura 1.** Esquema de la metodología de trabajo para calcular el módulo de elasticidad estático en una viga biapoyada.



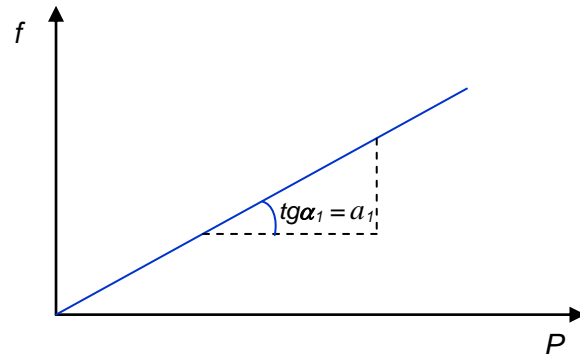
Una vez obtenida las deformaciones ocasionadas por los diferentes pesos utilizados, se procedió al cálculo del módulo de elasticidad estático utilizando la siguiente ecuación:

$$f = \frac{L^3}{48 * I * E_{est}} * P$$

$$y = f ; x = P$$

$$y = a_1 x + b ; (b \approx 0)$$

$$a_1 = \frac{L^3}{48 * I * E_{est}}$$



Dónde:

$f$ : Deformación de la pieza de madera (m).

$P$ : Carga (N). “Carga = Peso (Kg) \* 9.8 (m/s<sup>2</sup>)”.

$L$ : Longitud de la viga entre apoyos (m).

$I$ : Momento de inercia (m<sup>4</sup>).

$E_{est}$ : Módulo de elasticidad estático (N/mm<sup>2</sup>).

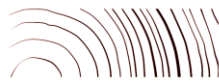
### Módulo de elasticidad dinámico por vibración armónica en vigas empotradas.

Este método consiste en la medición del periodo de vibración armónica para distintas longitudes libres de una viga empotrada en uno de sus extremos. En el extremo libre se coloca un peso (1Kg) y posteriormente se le aplica un leve impulso induciendo a la tabla a un movimiento de oscilación armónica simple, Figura 2.

Este proceso se aplicó para distintas longitudes libres de la viga, dividiendo ésta en tramos de 10 cm y tomando medidas del periodo para longitudes libres entre 1 m hasta 50 cm.



**Figura 2.** Metodología seguida para calcular el módulo de elasticidad a partir del periodo



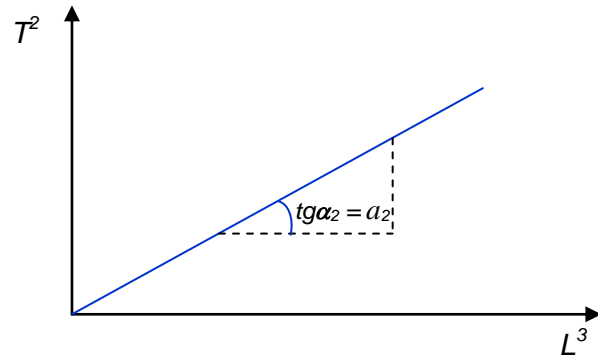
Tras aplicar el impulso a la tabla, se mide el tiempo que tarda en realizar 10 oscilaciones, obteniendo así el periodo de vibración para las distintas longitudes libres utilizadas. Una vez obtenida esta relación entre el periodo y la longitud libre se obtiene el módulo de elasticidad dinámico a partir de:

$$T = 4\pi \sqrt{\frac{M * L^3}{E_{va} * e * h^3}}$$

$$y = T^2 ; x = L^3$$

$$y = a_2 x + b ; (b \approx 0)$$

$$a_2 = \frac{16\pi^2 * M}{e * h^3 * E_{va}}$$



Dónde:

$T$  = Periodo (s).

$M$  = Masa o peso de la pieza (Kg).

$L$  = Longitud libre de la pieza (m).

$E_{va}$  = Módulo de elasticidad dinámico vibración armónica (N/mm<sup>2</sup>).

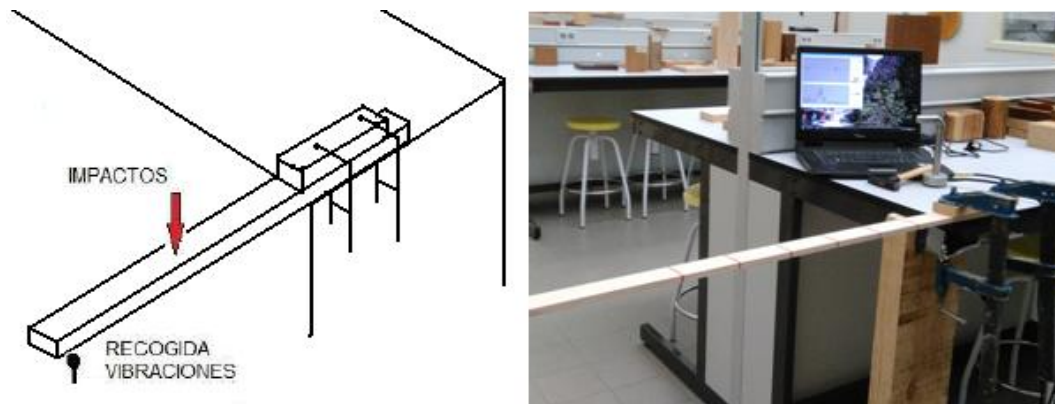
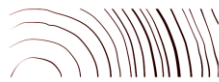
$e$  = Anchura de la pieza (m).

$h$  = Altura de la pieza (m).

### Frecuencia de vibración transversal en vigas empotradas.

Este método consiste en la medición de la frecuencia de vibración elástica, para distintas longitudes libres de una viga empotrada, que en laboratorio se simuló mediante unos sargentos o gatos.

En el extremo libre de la viga se sitúa un micrófono, que captura el sonido de la vibración de las vigas cuando son sometidas a un impacto con un martillo en el centro del extremo libre de la viga. Este proceso se realizó para distintas longitudes libres de la viga, dividiendo la viga en tramos de 10 cm y tomando medidas de la frecuencia para longitudes libres entre 1 m hasta 50 cm, Figura 3.



**Figura 3.** Ensayo de la determinación de la frecuencia de vibración transversal en empotramiento.

Las vibraciones recogidas por el micrófono son analizadas por el software FFT (Fast Fourier Transform Analyser) de Fakopp. El software devuelve la frecuencia principal de vibración ( $f$ ) en Hertzios y otras frecuencias armónicas secundarias.

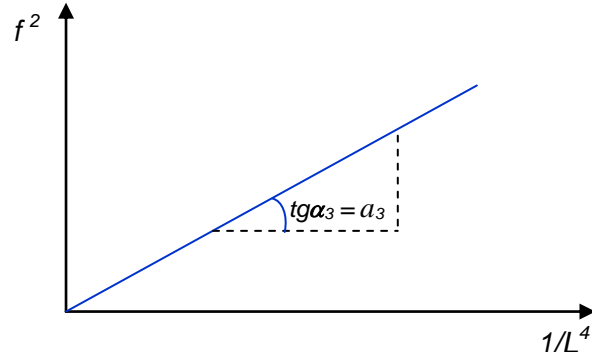
Una vez obtenidos la frecuencia para distintas longitudes libres, se calcula el módulo de elasticidad mediante la siguiente ecuación:

$$f = C_n * \sqrt{\frac{E_{vt} * I}{\rho * a * b * L^4}}$$

$$y = f^2; \quad x = 1/L^4$$

$$y = a_3x + b; \quad (b \approx 0)$$

$$a_3 = \frac{C_n^2 * E_{vt} * I}{\rho * a * b}$$



Dónde:

$f$ : Frecuencia de vibración (Hz)

$C_n$ : Coeficiente que depende de la frecuencia (principal, 1<sup>er</sup> armónico, 2<sup>o</sup>, 3<sup>o</sup>,...).

$E_{vt}$ : Módulo de elasticidad dinámico - vibración transversal inducida (N/mm<sup>2</sup>).

$I$ : Momento de inercia de la sección de la sección transversal de la pieza (m<sup>4</sup>).

$\rho$ : Densidad de la pieza (Kg/m<sup>3</sup>).

$a$ : anchura de la pieza (m).

$b$ : Altura de la pieza (m).

$L$ : Longitud libre de la viga (m).

### Módulo de elasticidad mediante ultrasonidos.

Con este método se determina el módulo de elasticidad dinámico mediante la velocidad de paso de la onda ultrasónica entre las testas de la pieza de madera. Para ello se ha

utilizado el equipo ultrasónico Fakopp Microsecond Timer, que trabaja por transmisión ultrasónica entre dos palpadores, un emisor y un receptor, que son clavados en la madera a una longitud conocida. El equipo mide el tiempo que tarda en pasar la onda de un extremo al otro después de haber sometido al emisor a un leve golpe.

Una vez obtenido el tiempo que tarda en llegar la onda ultrasónica de testa a testa, se procede al cálculo de la velocidad longitudinal y el módulo de elasticidad.

$$V_{ultra} = \frac{L}{t} \qquad E_{ultra} = \rho * V_{ultra}^2$$

Dónde:

*V*: Velocidad ultrasónica (m/s).

*L*: Longitud de la viga (m).

*t*: Tiempo de la onda ultrasónica en llegar de un extremo a otro (µs).

*E<sub>ultra</sub>*: Módulo de elasticidad (N/mm<sup>2</sup>).

*ρ*: Densidad de la pieza (Kg/m<sup>3</sup>).

### Análisis descriptivo

Para cada una de las variables objeto de estudio se realizó un análisis descriptivo por separado. Estas variables objeto de estudio son la densidad y los distintos módulos de elasticidad calculados con los diferentes métodos descritos anteriormente. El análisis de normalidad se ha realizado atendiendo a los valores de sesgo y curtosis, al gráfico de probabilidad normal y al test de Shapiro-Wilk.

Los resultados obtenidos para la densidad y los distintos módulos de elasticidad se han recogido en la tabla 1.

**Tabla 1.** Resumen estadístico para la densidad. n: Tamaño de la muestra, DE: Desviación estándar, CV: Coeficiente de variación, IC: Intervalo de confianza.

	n	Media	Mediana	σ	CV %	IC	Normalidad
<b>Densidad</b>	23	417,94 kg/m <sup>3</sup>	404	65,94	15,77	+/- 28,51	Si
<i>E<sub>est</sub></i>	23	12070,6 N/mm <sup>2</sup>	12276,0	3685,01	30,52	+/- 1593,52	SÍ
<i>E<sub>ultra</sub></i>	23	11422,5 N/mm <sup>2</sup>	11378,0	2921,74	25,57	+/- 1295,43	SÍ
<i>E<sub>va</sub></i>	23	11229,2 N/mm <sup>2</sup>	10659,0	2981,98	26,55	+/- 1289,51	SÍ
<i>E<sub>vt</sub></i>	23	9746 N/mm <sup>2</sup>	9792,0	2527,57	25,93	+/- 1093,0	SÍ

Como se puede observar en la tabla anterior, la densidad media para *Populus x euramericana* (Dode) Guiner expresada a través de su Intervalo de confianza al 95% resultó ser de 417,95 +/- 28,52 Kg/m<sup>3</sup>, presentando un coeficiente de variación del 15,77%.

Los valores de los módulos de elasticidad determinados por los diferentes métodos presentan una variabilidad similar (test de verificación de la varianza de Levene's >0,05) con un valor del coeficiente de variación entre el 25 y el 30%

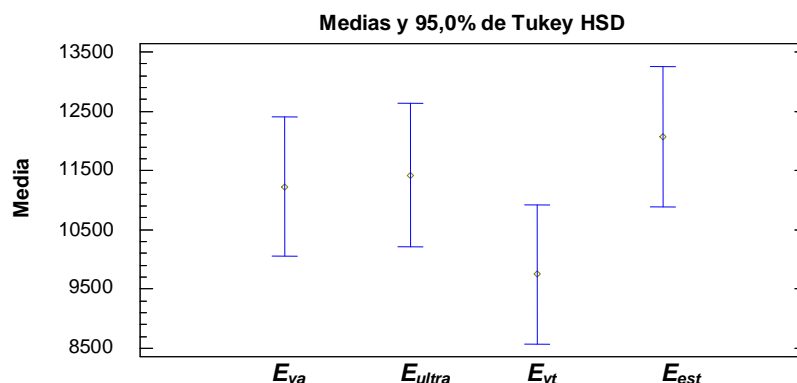
### Análisis comparativo de los Módulos de Elasticidad

Asumidos los supuestos de independencia, normalidad y homocedasticidad de las poblaciones se realizó el test (ANOVA) para detectar diferencias entre los valores medios de las poblaciones. En la Tabla 2 se puede observar la tabla ANOVA correspondiente a las 4 variable de estudio, ésta descompone la varianza de los datos en dos componentes: una componente entre-grupos y una componente dentro de grupo. El test presenta un p-valor > 0,05, indicando que no hay una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de los diferentes módulos de elasticidad, con un nivel de confianza del 95%.

**Tabla 2.** Tabla ANOVA para los diferentes módulos de elasticidad calculados.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	6,64876E7	3	2,21625E7	2,37	0,0762
Intra grupos	8,1419E8	87	9,35851E6		
Total (Corr.)	8,80678E8	90			

El gráfico de Medias (HSD de Tukey), Figura 4, nos muestra indicios de que los módulos de elasticidad estático ( $E_{est}$ ) y el módulo de elasticidad dinámico determinado por vibraciones transversales ( $E_{vt}$ ) están en el límite de poder afirmar que son diferentes, por lo que sería necesario estudiar un mayor tamaño muestral para conocer el comportamiento con más exactitud.



**Figura 4.** Gráfico de medias con intervalo del 95% de confianza de Tukey HSD

### Análisis predictivo

Con el análisis predictivo se buscan las relaciones existentes entre los valores del módulo de elasticidad estático, que se tomará como referencia, y los valores de los diferentes módulos de elasticidad dinámicos, utilizando para ello un análisis de regresión lineal simple.

En la Tabla 3 se recoge el resumen de las regresiones lineales obtenidas para cada una de las relaciones Módulo de elasticidad estático versus Módulos de elasticidad dinámicos:

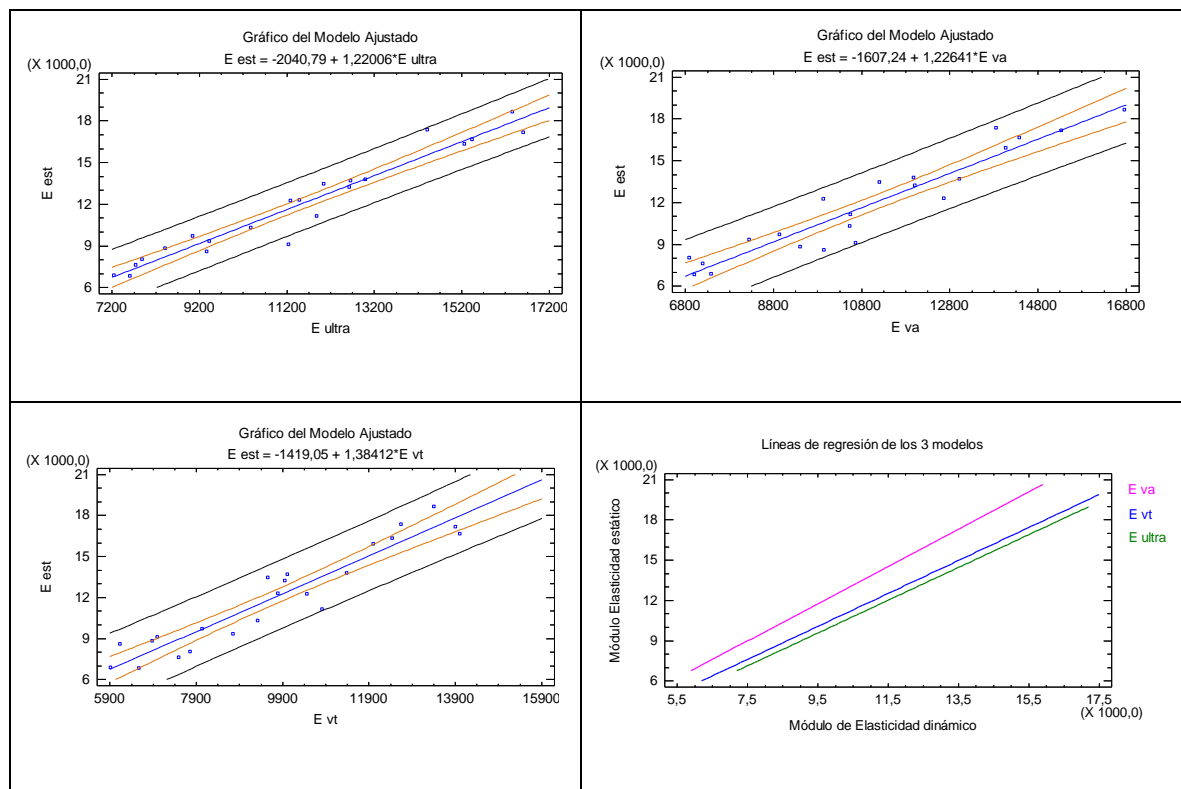




**Tabla 3.** Modelos lineales para la predicción del Módulo de elasticidad estático ( $E_{est}$ ).

Variable predictora	Intercepto	pendiente	R <sup>2</sup> ajust. %	Coef. corre.	p-valor del modelo
$E_{ultra}$	-2040,79	1,22006	93,9	0,97	0,000
$E_{va}$	-1607,24	1,22641	89,7	0,95	0,000
$E_{vt}$	-1419,05	1,38412	89,7	0,95	0,000

En la Figura 5 se representan las rectas de regresión que relacionan el Módulo de elasticidad estático con los módulos de elasticidad dinámicos determinados por diferentes métodos.



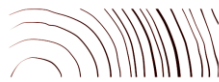
**Figura 5.** Gráficos de los modelos ajustados Módulo de elasticidad estático - Módulos de elasticidad dinámicos

### Conclusiones

Se debe destacar que el número de muestras y ensayos realizados han sido, en casi todos los casos, los suficientes para que los resultados puedan considerarse válidos atendiendo a la heterogeneidad que la madera, como material natural, presenta.

Los valores obtenidos para los diferentes módulos de elasticidad han sido:

- Para el método del periodo de vibración armónica, el módulo de elasticidad ( $E_{va}$ ) medio para la población es de 11229,2 N/mm<sup>2</sup>.



- Para el método de la frecuencia de vibración transversal en voladizo,  $E_{vt}$  medio para la población es de 9746,0 N/mm<sup>2</sup>.
- Para el método de ultrasonidos, el  $E_{ultra}$  medio para la población es de 11422,5 N/mm<sup>2</sup>.
- Para el método estático de escala de cargas, el  $E_{est}$  medio para la población es de 12070,6 N/mm<sup>2</sup>.

Del Análisis de la Varianza se concluye que no existen diferencias significativas entre ellos, si bien se debería aumentar el número de muestras a ensayar para validar definitivamente esta afirmación en el caso de  $E_{est}$  y  $E_{vt}$ . La prueba de rangos múltiples muestra que el  $E_{vt}$ , es igual que el resto pero gráficamente podemos observar que se encuentra en el límite. Un análisis con mayor número de muestras de la población nos permitiría saber que ocurre con él, si se separa o se iguala al resto.

Las relaciones entre los métodos de evaluación de los diferentes módulos de elasticidad dinámicos y el módulo de elasticidad estático calculado a partir de escala de cargas, presentan coeficientes de correlación muy altos: 0,946, 0,949, 0,970 y unos valores de  $R^2$  cercanos al 90%, por lo que sus capacidades de predicción, en todos los casos, son muy altas.

### **Bibliografía**

ACUÑA, L.; DIEZ BARRA, R. AND CASADO, M. (2006) Ultrasounds and the quality of structural timber. Application to *Pinus pinaster* Ait. [Los ultrasonidos y la calidad de la madera estructural. Aplicación a *Pinus pinaster* Ait.] Bol. Inf. CIDEU 2:7-26 [in Spanish].

ACUÑA, L.; BASTERRA, L. A.; CASADO, M.; LÓPEZ, G.; RAMÓN-CUETO, G.; RELEA, E.; MARTINEZ, C. & GONZALEZ, A. (2011) Application of resistograph to obtain the density and to differentiate wood species. *Materiales de Construcción* 61(303):451-464 doi:10.3989/mc.2010.57610

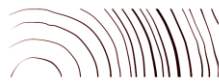
AUCIELLO, N. M. (1996). Transverse vibrations of a linearly tapered cantilever beam with tip mass of rotary inertia and eccentricity. *Journal of Sound and Vibration* 194(1):25-34.

BANERJEE, J. R. (1999) Explicit frequency equation and mode shapes of a cantilever beam coupled in bending and torsion. *Journal of Sound and Vibration* 224(2):267-281.

BARADIT, E.; NIEMZ, P. AND FERNÁNDEZ-PÉREZ, A. (2013) Physical and mechanical properties of some chilean softwoods and hardwoods using ultrasound. *Maderas. Ciencia y tecnología* 15(2):235-244.

BUCUR, V., BÖHNKE, I., 1994: Factors affecting ultrasonic measurements in solid wood. *Ultrasonics*, 32 (5). P. 385 - 390.

BUCUR, V., 2006: *Acoustic of wood*. 2nd Edition. Springer. Germany.



BURDZIK, W. M. G. AND NKWERA, P. D. (2002) Transverse vibration tests for prediction of stiffness and strength properties of full size *Eucalyptus grandis*. Forest Products Journal 52:63-67.

CASADO, M.; ACUÑA, L.; VECILLA, D.; BASTERRA, L. A.; RELEA, E.; LÓPEZ, G. AND RAMÓN-CUETO, G. (2009) Técnicas vibratorias aplicadas a madera estructural de *Populus x euramericana*. V Congreso Forestal Español. Ávila. 14 pp. [in Spanish].

CASADO, M.; ACUÑA, L.; BASTERRA, L. A.; RAMÓN-CUETO, G. AND VECILLA, D. (2012) Grading of structural timber of *Populus x euramericana* clone I-214. Holzforschung 66 (5):633–638.

DIGILOV, R. M. (2008) Flexural vibration test of a cantilever beam with a force sensor: fast determination of Young's modulus. Eur. J. Phys. 29(2008):589–597

DIVOS, F. AND TANAKA, T. (2005) Relation between static and dynamic modulus of elasticity of wood. Acta Silv. Lign. Hung 1:105-110

DIVOS, F. AND SISMANDY KISS, F. (2010) Strength Grading of Structural Lumber by Portable Lumber Grading - effect of knots. The Future of Quality Control for Wood & Wood Products, Edinburgh The Final Conference of COST Action E53. 7 pp.

FARGHALY, S. H. (1992) Bending vibration of an axially loaded cantilever beam with an elastically mounted end mass of finite length. Journal of Sound and Vibration, 156:373-380.

GUGOZE, M. AND BATAN, H.. 1986. A note on the vibrations of a restrained cantilever beam carrying a heavy tip body. Journal of Sound and Vibration 106:533-536.

HAINES, D. W.; LEBAN, J. M. AND HERBE, C. (1996) Determination of Young's modulus for spruce, fir and isotropic materials by the resonance flexure method with comparisons to static flexure and other dynamic methods. Wood Science and Technology 30(1996) 253-263.

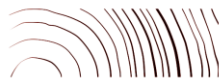
HEARMON, R. (1958) The influence of shear and rotary inertia on the free flexural vibration of wooden beams. Brit J Appl Phys 9:381-388.

HEARMON, R. (1966) Theory of the Vibration Testing of Wood. For Prod J 16:29-40.

HERNÁNDEZ, R; KOUBAA, A; BEAUDOIN, M.; FORTIN, Y. 1997. Selected mechanical properties of fast-growing poplar hybrid clones. Wood and Fiber Science, vol 30, n 2. 1998.

HU, Y.; NAKAO, T.; NAKAI, T.; GU, J. AND WANG, F. (2005) Vibrational properties of wood plastic plywood. J. Wood Sci.51:13-17.

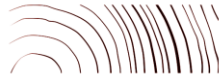
HUNT, J.; ZHANG, H.; GUO, Z. AND FU, F. (2013) Cantilever beam static and dynamic response comparison with Mid-point bending for thin MDF composite panels. BioRes. 8(1):115-129.



- ILIC, J. (2003) Dynamic MOE of 55 species using small wood beams. *Holz als Roh- und Werkstoff* 61(3):167-172. doi:10.1007/s00107-003-0367-8
- JANG, S. K. AND BERT, C. W. (1989) Free vibration of stepped beams: exact and numerical solutions. *Journal of Sound and Vibration* 130:342-346.
- KARLINASARI, L.; BAIHAQI, H.; MADDU, A. AND RIO MARDIKANTO, T. (2012) The Acoustical Properties of Indonesian Hardwood Species. *Makara J. Sci.* 16(2):110-114. doi: 10.7454/mss.v16i2.1405
- KISA, M. (2004) Free Vibration Analysis of a Cantilever Composite Beam with Multiple Cracks. *Composites Science and Technology*, 64(9):1391-1402.
- LEE, K. T. (2009) Vibration of two cantilever beams clamped at one end and connected by a rigid body at the other. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 23:358-371.
- MERHAR, M. AND BUČAR, B. (2008). Determination of correction coefficient for dynamic modulus of elasticity obtained by analysing the frequency response of a clamped cantilever specimen. *Holz Roh Werkst* 66:233–235.
- RAJESHWAR, B.; BENDER, D. A.; BRAY, D. E.; MCDONALD, K. A. 1997. An ultrasonic technique for predicting tensile strength of southern pine lumber; *American Society of Agricultural Engineers* 0001-2351; VOL. 40(4):1153-1159.
- ROOHNIA, M. (2014) An Estimation of Dynamic Modulus of Elasticity in Cantilever Flexural Timber Beams. *Drvna Industrija* 65(1):3-10.
- Ross, R. and Pellerin, R. (1994) Non-destructive Testing for Assessing Wood Members in Structures: A Review. United States Department of Agriculture. Forest Service. Forest Products Laboratory General Technical Report FPL-GTR-70. 42 pp.
- Ross, R. J.; Zerbe, J. I.; Wang, X.; Green, D. W. and Pellerin, R. F. (2005) Stress Wave Nondestructive Evaluation of Douglas - Fir Peeler Cores, *Forest Products Journal* 55(3):90-94.
- SANDOZ, J.L. (1989) *Grading of Construction Timber by Ultrasound*. *Wood Science and Technology*, 23, 95-108. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00350611>.
- SANCHEZ-BEITIA, S. AND BARRALLO, J. (2000) Learning heritage restoration, learning mathematics. *Proceedings of the International Conference on Mathematics Education into the 21st Century: Mathematics for Living*, Ed.: Alan Rogerson. Amman, Jordania. <http://math.unipa.it/~grim/Jsanchezbarrallo.pdf>. 5 pp.
- SCHAD, K. C.; KRETSCHMANN, D. E.; MCDONALD, K. A.; ROSS, R. J. AND GREEN, D. A. (1995) Stress Wave Techniques for Determining Quality of Dimensional Lumber from Switch Ties. *Forest Products Laboratory*, FPL-RN-0265.

## II CBCTEM

Congresso Brasileiro de Ciência  
e Tecnologia da Madeira  
Belo Horizonte - 2015



II Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira  
Belo Horizonte - 20 a 22 set 2015



SEDIK, Y.; HAMDAN, S. AND JUSOH, I. (2010) Acoustic Properties of Selected Tropical Wood Species. *J Nondestruct Eval* 29:38-42.

WANG, S. Y.; CHEN, J. H.; TSAI, M. J.; LIN, C. J. AND YANG, T. H. (2008) Grading of softwood lumber using non-destructive techniques. *Journal Of Material Processing Technology* 208(1):149-158.

WANG, Z.; LI, L. AND GONG, M. (2012) Measurement of dynamic modulus of elasticity and damping ratio of wood-based composites using the cantilever beam vibration technique. *Construction and Building Materials* 28:831-834.

YU, S. D. (2009) Free and forced flexural vibration analysis of cantilever plates with attached point mass. *Journal of Sound and Vibration*. 321:270-285.