



MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO Y DINÁMICO EN TABLAS DE ESCUADRÍAS COMERCIALES DE PINO HÍBRIDO

Rosa A. WINCK^{1,2*}, María C. AREA³, Diego R. AQUINO¹, Hugo E. FASSOLA¹, Aldo E. KELLER¹, Adelaida BRAGAÑOLO², María E. GAUCHAT¹

RESUMEN

En piezas aserradas de escuadrías comerciales de pino híbrido, *Pinus elliottii* var. *elliottii* × *Pinus caribaea* var. *hondurensis* F₁ INTA-PINDO, provenientes de dos ensayos de progenies de 11 años de edad, se determinó la densidad con el equipo Metriguard (DensMet), el módulo de elasticidad (MOEe) y de rotura (MOR) a la flexión estática y el módulo de elasticidad dinámico (MOEv) por vibración transversal. Se aserraron 90 rollizos de 3,15 m de largo obtenidos inmediatamente por encima del 1,3 m de altura, obteniéndose un total de 274 piezas. Estas fueron secadas en cámara, registrándose sus dimensiones y contenido de humedad al ser ensayadas. Se ajustó una función para predecir el MOEe a partir del MOEv para madera interna y externa. Se realizó un análisis de correlación entre variables, encontrándose relación significativa y positiva entre el MOEe con el MOEv, MOR y densidad. El método no destructivo por vibración transversal resultó eficiente para la determinación de la rigidez, y con mayor precisión para las piezas laterales o externas.

Palabras clave: rigidez, vibración transversal, *Pinus elliottii* var. *elliottii* × *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, densidad, propiedades de la madera

1. INTRODUCCIÓN

Las coníferas más utilizadas para plantaciones forestales en las provincias de Misiones y Corrientes son *Pinus taeda* L. y *Pinus elliottii* var. *elliottii* Engelm. En menor escala se cultiva el F₂^{2*} de pino híbrido *Pinus elliottii* var. *elliottii* × *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (PEE x PCH) desarrollado en Australia (la F₂ lograda por cruzamientos libres de individuos F₁^{3*} del híbrido entre PEE x PCH, debido principalmente al crecimiento, rectitud de fuste, diámetro de ramas y estructura de copa (Belaber et al., 2022). Actualmente, la superficie implantada con este material alcanza aproximadamente 21 000 hectáreas (Belaber et al., 2018). Existen algunos estudios referidos al comportamiento estructural de la madera del pino híbrido australiano (Wu et al., 2009, Bailleres et al., 2019), y también se ha generado información local sobre las propiedades de la madera del F₁ INTA-PINDO (Winck et al., 2019; Rotundo et al., 2019; Winck et al., 2020; Winck et al., 2021; Winck et al., 2022). Una forma de predecir indirectamente la rigidez de la madera es recurriendo a las técnicas acústicas. Estas técnicas brindan una alternativa que permite superar los problemas de las pruebas estáticas, de carácter destructivo, que exigen tiempo y son más costosas (Ross y Pellerin, 2015). El objetivo de este trabajo fue determinar la densidad estacionada con el equipo Metriguard, el módulo de elasticidad dinámico por vibración transversal y el módulo de elasticidad y de rotura a la flexión estática de piezas aserradas en escuadrías comerciales de madera interna y externa de pino híbrido F₁ INTA-PINDO, además de corroborar la efectividad de estos métodos no destructivos para evaluar la madera de este taxón.

^{1*}F₂: material seminal obtenido de la polinización libre de híbridos F₁.

^{3*}F₁: material seminal obtenido de la polinización controlada de especies puras (PEE y PCH).

INTA, EEA Montecarlo, Montecarlo, Misiones, Argentina. *Contacto: winck.rosa@inta.gob.ar

²IMAM, UNaM, FCF, Laboratorio de Tecnología de la Madera, Eldorado, Misiones, Argentina.

³IMAM, UNaM, CONICET, FCEQYN, Programa de Celulosa y Papel (PROCYP), Posadas, Misiones, Argentina



2. MATERIALES Y MÉTODOS

El material utilizado se obtuvo de dos ensayos de progenies de pino híbrido F₁ INTA-PINDO ubicados a los 26° 33' latitud S y 54° 40' longitud O (sitio 1) y a los 26° 09' latitud S y 54° 26' longitud O (sitio 2). A los 11 años de edad se apearon 90 árboles, 45 de cada sitio, teniendo en cuenta la variabilidad en diámetros. De cada árbol se obtuvo un rollizo a partir de 1,30 m de altura desde el suelo hasta los 4,45 m de altura. Estos fueron aserrados obteniéndose tirantes de 3"x3" y 3"x5" (piezas internas) y tablas de 1" y 1 ½" de espesor (piezas externas) de ancho variable, alcanzando un total de 274 piezas. Las mismas fueron numeradas y secadas en cámara. Posteriormente, de cada pieza se determinó el contenido de humedad con un xilohigrómetro de agujas que funciona por el método de resistencia con una precisión de 0,2 %, se registraron sus dimensiones y se determinó el módulo de elasticidad dinámico mediante vibración transversal (MOEv). Finalmente, las piezas fueron sometidas a ensayo destructivo con máquina universal para la obtención del módulo de elasticidad (MOEe) y de rotura (MOR) a la flexión estática.

Medición del módulo dinámico por vibración transversal y densidad de la pieza

Con el equipo Metriguard® E-Computer – Modelo 340 se determinó la densidad y el MOE dinámico por vibración de las piezas aserradas. Este equipo cuenta con una balanza incorporada con la que se obtuvo el peso de cada pieza, además, cargando previamente sus dimensiones al software del ordenador del equipo, permite calcular su volumen y estimar su densidad. Además, con los valores de frecuencia natural de vibración determinados por el equipo, la longitud entre apoyos y una constante de calibración, entrega en pantalla los valores MOEv, calculados a partir de una ecuación incorporada al sistema (Metriguard, 2002).

Medición del módulo de elasticidad y de rotura a la flexión estática con máquina universal de ensayos

El ensayo a la flexión estática se realizó con una máquina electromecánica universal de ensayos DIDACTA® modelo 10407030, de procedencia italiana, con capacidad de 300 kN y una sensibilidad de 300N. Con este equipo se determinó el MOEe y el MOR, obtenidos con el software "MetroCom"-Dina 960 xp incorporado al equipo, siguiendo el procedimiento indicado en la norma IRAM 9663 (2013), documentándose también observaciones consideradas de importancia para la interpretación de los resultados (cantidad de anillos, tipo de corte, presencia de médula, resinas, nudos, entre otros).

Análisis estadísticos

Se calcularon los estadísticos descriptivos para las variables analizadas. Luego se ajustó una ecuación por regresión lineal múltiple recurriendo a las variables *Dummy* (Schneider y Tonini, 2003), ajustando un único modelo (ecuación 1), el que posteriormente, teniendo en cuenta la posición de la pieza, se reduce a la (ecuación 2) cuando el tipo de pieza corresponde a la posición interna (TP=interna, X=1), y a la (ecuación 3) cuando la pieza es externa (TP=externa, X=0).

Modelo general:
$$Y_i = \beta_1 + \beta_2 X_i + \beta_3 D_{1i} + E \quad (\text{Ecuación 1})$$

Para piezas internas:
$$E(Y_i/D_{1i} = 1, X_i) = (\beta_1 + \beta_3) + \beta_2 X_i \quad (\text{Ecuación 2})$$

Para piezas externas:
$$E(Y_i/D_{1i} = 0, X_i) = \beta_1 + \beta_2 X_i \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde Y_i: variable dependiente; B₁, B₂ y B₃: coeficientes del modelo; X: variable regresora cuantitativa; D: variable auxiliar o *Dummy*; E: error. El número de variables auxiliares D_i a incluir es igual al número de niveles del factor de clasificación que se desea modelar menos 1. Cada variable auxiliar es una variable dicotómica que asume el valor 1 sólo para un nivel del factor de clasificación. La variable D adoptó el valor 1 para piezas internas y 0 para piezas externas.

Para evaluar el modelo de predicción del módulo de elasticidad estático, a través de la regresión lineal con variables *Dummy*, se tuvo en cuenta el coeficiente de determinación ajustado (R² ajustado), el error estándar (MSE) y distribución de los residuos.



Para determinar la normalidad de la distribución de las variables se recurrió a herramientas gráficas. Para analizar la independencia de los residuos se utilizó el test de Durbin-Watson. La aptitud del modelo se verificó con la bondad del ajuste contra sus propios datos. Para ello se efectuó una regresión lineal entre valores de MOE observados versus MOE estimados, determinándose el error porcentual.

También se realizaron análisis de correlación múltiple entre variables. Los análisis estadísticos se realizaron utilizando el software Statgraphics® Centurion XV, versión, 2006 (www.statgraphics.com).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El contenido de humedad medio de todos los cuerpos de prueba ensayados fue de 13,7 % con valores mínimos y máximos de 11,8 % y 15,5 %, respectivamente. Los valores medios de la densidad estacionada obtenida con Metriguard, MOEe, MOR y MOEv fueron corregidos al 12 % de humedad.

Los valores medios de DensMet, MOR, MOEv y MOEe fueron de 388 kg/m³, 382 kg/cm², 6,3 Gpa y 9,2 Gpa, respectivamente. Con un coeficiente de variación bajo (10 %) para la densidad y altos (26 %, 29 % y 36 %) para los valores de MOEv, MOEe y MOR. Fank (2018) obtuvo cifras de CV superiores para *Pinus elliottii* y *Pinus taeda* (densidad: 13 % y 15 %, MOEe: 21 % y 40 %, MOR: 38 % y 50 %).

Los valores medios de MOEe para el pino híbrido F₁ INTA-PINDO determinados de forma destructiva superaron al valor mínimo (7 Gpa) exigido por las normas IRAM 9663 (2013) para formar parte de la clase 2 de resistencia, mientras que algunas piezas superaron el valor medio necesario (12 Gpa) para formar parte de la clase 1 de resistencia.

Comparación entre valores de módulos de elasticidad

El valor de MOEv mostró un comportamiento homogéneo para la madera lateral o externa, mientras que para las piezas centrales o internas mostró un patrón atípico. Se visualizó que, en piezas centrales con presencia de resina, identificada mediante la coloración de su leño, arrojó valores altos de MOEv, mientras que los valores de MOEe para esas mismas piezas fueron bajos.

En este estudio el MOEe fue mayor al MOEv. De manera similar, França et al. (2018b) para piezas de 2"x10" de pinos amarillos del sur determinó valores de MOEe ligeramente superior a los de vibración transversal determinado con el equipo Metriguard. Contrariamente, algunos autores informan que las técnicas acústicas, sobre todo las basadas en el tiempo de vuelo (TOF), sobreestiman la rigidez de la madera en comparación con los ensayos a la flexión (Posta et al., 2016; Ross y Pellerin, 2015; Videla et al., 2013). Por su parte, Hassan et al. (2013) reportaron valores de MOE dinámicos obtenidos por vibración transversal (MOEv), mayores que los valores estáticos. No obstante, diversos estudios realizados con piezas de dimensiones comerciales han demostrado un grado de asociación entre el MOEd obtenido por métodos acústicos y el MOEe, en general, con coeficientes de determinación (R²) entre 0,79 - 0,92 para pinos (Yang et al., 2017; F. França et al., 2018a, 2019, 2020; T. França et al., 2018b).

En las ecuaciones 4, 5 y 6 se representan los modelos de predicción del MOEe a partir del MOEv, el modelo general ajustado (Ecuación 4) y reducido según se trate de madera externa (Ecuación 5) o interna (Ecuación 6).

$$MOEe_{General} = 3,19 + 1,06 * MOEv - 0,84 * (TP = int) - 0,29 * MOEv * (TP = int) \text{ (Ecuación 4)}$$

El valor de R² ajustado, error estándar del estimador y estadístico Durbin-Watson fueron de 74 %, 1,3 y 2,1 (p=0,77), respectivamente. El valor-p para DW es > 0,05, lo que indica la independencia de los datos.

Este modelo general, según la posición de la pieza se reduce a:

$$MOEe_{Ext} = 3,19 + 1,06 * MOEv \text{ (Ecuación 5)}$$

$$MOEe_{Int} = 2,35 + 0,76 * MOEv \text{ (Ecuación 6)}$$

En el Gráfico 1 se muestra el ajuste obtenido para un modelo de regresión lineal que describe la relación entre MOEe y MOEv para piezas externas e internas.

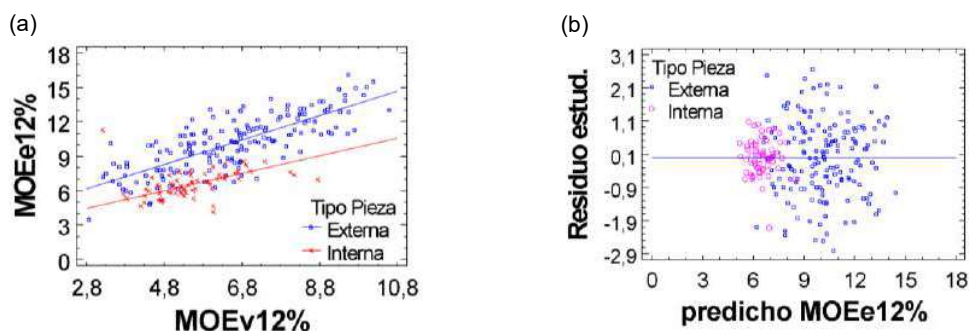


Gráfico 1: a) MOEe versus MOEv. b) Residuos estudentizados para el MOEe estimado por vibración.

El error % promedio del ajuste del modelo general fue de -15,81 %, mientras que cuando se consideran solamente las piezas externas (que alcanzan valores estructurales), se reduce a -5,77 %. En un estudio realizado para *Pinus taeda* de 20 años de edad el error de estimación del MOE estático estimado con el Metriguard arrojó un valor de -13,25 % (Videla et al., 2013).

Correlaciones entre módulo de elasticidad (estático y dinámico), módulo de rotura y densidad

El valor de correlación (r) entre MOEe y MOEv (Metriguard) fue de 0,79. Valores de r algo superiores al de este estudio fueron determinados para *Picea abies*, entre MOEe y MOE Metriguard (Posta et al., 2016) y para pinos amarillos del sur entre MOEe y MOEd (con distintos dispositivos) (F. França et al., 2019, 2020). También Fassola et al. (2014) encontraron una correlación de 0,79 entre MOEe y MOE Metriguard para *Pinus taeda* de 20 años de edad.

Por otra parte, para Máquina universal de ensayo los valores de r para el MOR y MOE (estático y dinámico) fueron de 0,68 y 0,54 para Metriguard. Estos resultados son similares a los encontrados en la literatura, donde se mencionan valores de r desde 0,64 a 0,82 entre MOR y MOE (estático y dinámicos) (Pazlar et al., 2011 y Faggiano, 2013), indicando que el MOEe es mejor indicador del MOR que el MOEd.

La densidad es otro indicador adecuado de la resistencia. El valor de r obtenido en este estudio entre el MOR y la densidad fue de 0,41, mientras que, en la literatura se mencionan valores superiores, entre 0,4 y 0,7 (Cruz y Machado 2013, Pazlar et al., 2011, Bucar y Bucar, 2011).

4. CONCLUSIONES

El método de vibración transversal resultó adecuado para predecir el módulo de elasticidad estático.

Las piezas internas con médula, infiltración de resinas o presencia de corazón corchoso (heartwood) afectaron al valor del módulo de elasticidad dinámico determinado por vibración. Sin embargo, el método demostró ser muy preciso para la estimación del módulo de elasticidad de la madera externa con características estructurales.

La madera aserrada de pino híbrido F₁ INTA-PINDO a los 11 años de edad, alcanzó y superó los valores mínimos de módulo de rotura y módulo de elasticidad a la flexión estática exigidos por las normas IRAM 9662-3, para formar parte de la clase 2 de resistencia en piezas de escuadrías comerciales.

5. LITERATURA CITADA

- BAILLERES, H.; LEE, D. J.; KUMAR, C.; PSALTIS, S.; HOPEWELL, G.; BRANCHERIAU, L. 2019. Improving returns from southern pine plantations through innovative resource characterisation.
- BELABER, E.; WINCK, R. A.; GAUCHAT, M. E.; ROTUNDO, C.; BULMAN, C.; FASSOLA, H. E. 2022. Productividad, calidad potencial de rollizos y características de la canopia en taxones de pinos en Misiones, Argentina. Artículo 293 en Revisión Revista Quebracho. FCF-UNSE. Pp 12.
- BELABER, E. C.; GAUCHAT, M. E.; REIS, H. D.; BORRALHO, N. M.; CAPPA, E. P. 2018. Genetic parameters for growth, stem straightness, and branch quality for *Pinus elliottii* var. *elliottii* × *Pinus caribaea* var. *hondurensis* F₁ hybrid in Argentina. *Forest Science* 64(6):595-608.
- BUCAR, D. G.; BUCAR, B. 2011. Strength grading of structural timber using the single mode transverse damped vibration method. *Wood Research* 56(1): 67-76.



- CRUZ, H.; MACHADO, J. S. 2013. Effects of beetle attack on the bending and compression strength properties of pine wood. In *Advanced Materials Research* (Vol. 778, pp. 145-151). Trans Tech Publications Ltd.
- FAGGIANO, B.; GRIPPA, M. R.; CALDERONI, B. 2013. Non-destructive tests and bending tests on chestnut structural timber. *Advanced Materials Research* 778: 167-174.
- FANK, P. Y. 2018. Caracterización físico-mecánica del pino resinoso (*Pinus taeda* y *Pinus elliotti*) cultivado en el nordeste argentino para uso estructural.
- FRANÇA, F. J. N.; FRANÇA, T. S. F. A.; SEALE, R. D.; SHMULSKY, R. 2020. Nondestructive evaluation of 2 by 8 and 2 by 10 southern pine dimensional lumber. *Forest Products Journal* 70(1):79-87.
- FRANÇA, F. J. N.; SEALE, R. D.; SHMULSKY, R.; FRANÇA, T. S. F. A. 2019. Assessing southern pine 2x4 and 2x6 lumber quality: longitudinal and transverse vibration. *Wood Fiber Sci* 51(1):1-14.
- FRANÇA, F. J.; SEALE, R. D.; ROSS, R. J.; SHMULSKY, R.; FRANÇA, T. S. A. 2018a. Using transverse vibration nondestructive testing techniques to estimate stiffness and strength of southern pine lumber. Res. Paper FPL-RP-695. Madison, WI: US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 8 p., 695.
- FRANÇA, T. S. F. A.; FRANÇA, F. J. N.; SEALE, R. D.; SHMULSKY, R. 2018b. Bending strength and stiffness of No. 2 grade southern pine lumber. *Wood Fiber Sci*. 50(2):1-15.
- HASSAN, K. T.; HORÁČEK, P.; TIPPNER, J. 2013. Evaluation of stiffness and strength of Scots pine wood using resonance frequency and ultrasonic techniques. *BioResources* 8(2): 1634-1645.
- IRAM 9663. 2013. Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires.
- MODEL 340 E-Computer Operation Manual Maintenance Manual (2002). Metriguard Inc. SE, 1120. SE Latah Street.
- PAZLAR, T.; SRPČIČ, J.; PLOS, M.; TURK, G. 2011. Non-destructive tests for strength grading of Slovenian structural sawn timber. In *Proceedings of the 17th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium* (Vol. 1, pp. 231-238).
- POSTA, J.; PTACEK, P.; JARA, R.; TEREBSYOVA, M.; KUKLIK, P.; DOLEJS, J. 2016. Correlations and differences between methods for non-destructive evaluation of timber elements. *Wood Res* 61(1):129-140.
- ROSS, R. J.; PELLERIN, R. F. 2015. *Nondestructive evaluation of wood*, Second Ed. Madison, WI: U.S.
- ROTUNDO, C. A. 2021. Estimación de parámetros genéticos de la calidad de la madera en árboles de pino híbrido (*Pinus elliottii* var. *elliottii* × *Pinus caribaea* var. *hondurensis*) utilizando metodologías no destructivas, FCEQyN-FCF. Universidad Nacional de Misiones.
- ROTUNDO, C.; WINCK, R. A.; AQUINO, D. A.; GAUCHAT, M. E.; BELABER, E. 2019. Evaluación operativa de una metodología no destructiva para la determinación del módulo de elasticidad dinámico del Pino híbrido F1, XVIII Jornadas Técnicas For. y Ambient., pp. 89-91.
- SCHNEIDER, P. R.; TONINI, H. 2003. Utilização de variáveis dummy em equações de volume para *Acacia mearnsii* De Wild. *Ciência Florestal* 13: 121-129.
- STATGRAPHICS® Centurion, XV. Statpoint Technologies. Inc. Version, (2006) (www.statgraphics.com)
- VIDELA, G. D.; FASSOLA, H. E.; WINCK, R. A. 2013. Clasificación de tablas de *Pinus taeda* para uso estructural por método vibración transversal y su validación con ensayos destructivos en maquina universal. 4º Congreso Forestal Argentino y Latinoamericano. 24 al 27 de septiembre del 2013. ISSN 1669-6786. Resumen.
- WINCK, R. A.; AREA, M. C.; BELABER, E. C.; AQUINO, D. R.; FASSOLA, H. E. 2022. Caracterización morfológica de las traqueidas de pino híbrido de rápido crecimiento. *Maderas. Cienc. y Tecnol. Maderas-Cienc Tecnol* 24(44):1-22.
- WINCK, R. A.; WINCK, L. R.; BELABER, E. C.; AQUINO, D. R.; FASSOLA, H. E.; ÁREA, M. C.; GAUCHAT, M. E. 2021. Parámetros indicadores de la calidad estructural de familias de pino híbrido F1 INTA-PINDO. XXXV Jornadas Forestales de Entre Ríos.
- WINCK, R. A.; GAUCHAT, M. E.; AREA, M. C.; BELABER, E. C.; FASSOLA, H. E. 2020. Caracterización de la madera de familias de pino híbrido F1 INTA-PINDO (*Pinus elliottii* var. *elliottii* × *Pinus caribaea* var. *hondurensis*) mediante métodos no destructivos. *Caracterizar* 2020. Caracterización de Materiales. IQUIMEFA-UBA-CONICET, Facultad de Farmacia y Bioquímica, UBA.
- WINCK, R. A. et al. 2019. Medición del tiempo de propagación de ondas para estimar rigidez de árboles en pie de Pino híbrido F1 INTA-PINDO. XVIII Jornadas Técnicas For. y Ambient., pp. 465-467.
- WU, H.; MCRAE, T.; SOUTHERTON, S.; GAPARE, W.; BALTUNIS, B.; LI, X.; DILLON, S.; IVKOVIC, M.; POWELL, M.; DIETERS, M.; HARDING, K.; MATHERSON, C.; ILIC. (2009). Quantitative and molecular genetics of juvenile wood traits in radiata and slash/Caribbean pines.
- YANG, B. Z.; SEALE, R. D.; SHMULSKY, R.; DAHLEN, J.; WANG, X. 2017. Comparison of nondestructive testing methods for evaluating No. 2 southern pine lumber: Part B, modulus of rupture. *Wood and Fiber Science*, 49(2), 134-145.