



UTILIZACION DE METODOS NO DESTRUCTIVOS POR VIBRACION PARA EVALUAR EL MODULO DE ELASTICIDAD EN TABLAS ASERRADAS DE *Eucalyptus grandis*

Ciro Andrés MASTRANDREA¹, Helen Michels DACOREGIO², Marina SBRAVATI³, Quelli
Cristina LOVATELL⁴

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue determinar la utilidad de un método no destructivo, acústico por vibraciones longitudinales, para predecir el módulo de elasticidad (MOE) en madera aserrada de *Eucalyptus grandis*. Para ello se comparó el módulo de elasticidad dinámico, obtenido con una técnica no destructiva (MOEd), por vibración en tablas enteras, con los valores de módulo de elasticidad estáticos (MOEe) determinados en probetas según norma UNE-EN 408:2011, con máquina universal de ensayos. Los resultados obtenidos indican que el método no destructivo utilizado (PLG), provee una buena estimación de la rigidez de la madera. El coeficiente de correlación obtenido entre las variables MOEd y MOEe fue de 0,85, estableciendo una fuerte asociación entre ambas variables. La bondad de ajuste del modelo de predicción se estimó mediante el coeficiente de determinación (R^2), del cual se obtuvo un valor igual a 0,74. Este resultado presenta valores inferiores a los encontrados por otros autores. La predicción de la rigidez de la madera es posible con equipos no destructivos por vibración, aunque para mejores determinaciones se debe considerar en próximas investigaciones evaluar en máquina universal de ensayos las piezas en sus dimensiones reales.

Palabras claves: *técnicas no destructivas, madera estructural, eucalipto, calidad, clasificación, velocidad acústica*

1. INTRODUCCIÓN

En Argentina la utilización de madera aserrada para usos estructurales, aun es escasa, aumentando su empleo en los últimos años. Desde la normativa argentina para usos estructurales de la madera, mucho se ha progresado con la reciente redacción del primer Reglamento Argentino de Estructuras de Madera CIRSOC 601 (INTI-CIRSOC, 2013) y la vigencia de las normas IRAM 9662-2 (2006); 9663 (2013) y 9664 (2013). La madera para uso estructural es un material técnico y debe ser normalizado, obligado a cumplir estándares de calidad y resistencia establecidos (Santaclara y Merlo, 2013). Por lo tanto es indispensable contar en el mercado con madera clasificada por grados de resistencia. Una de las principales formas de clasificar la madera para uso estructural es en forma visual, evaluando las singularidades que en ella aparecen e influyen en su resistencia (Fank y Mastrandrea, 2016). Según diferentes autores (Gemma *et al.*, 2005; Acuña *et al.*, 2007; Carballo *et al.*, 2007; Collar *et al.*, 2009), los métodos de clasificación visual subestiman la calidad estructural de una pieza, produciendo numerosos rechazos en piezas aptas para usos estructurales. Otra forma de evaluar la calidad estructural de la madera es por medio de métodos tradicionales, destructivos fijos o estáticos (máquina universal de ensayos), los cuales presentan como aspectos negativos la imposibilidad de analizar una pieza puesta en servicio, la obtención del resultado de una sola propiedad por ensayo, y en muchos casos la evaluación de las propiedades en piezas pequeñas por cuestiones de espacio y traslado. Por definición la evaluación por métodos no destructivos es la ciencia que identifica las propiedades físicas y mecánicas de una pieza o material sin alterar sus características y capacidad de

¹ EEA INTA Concordia mastrandrea.ciro@inta.gob.ar

² Estudiante Ingeniería Forestal universidad del estado de Santa Catarina (UDESC)

³ Estudiante Ingeniería Forestal universidad del estado de Santa Catarina (UDESC)

⁴ Estudiante Ingeniería Forestal universidad del estado de Santa Catarina (UDESC)



uso final (Pellerin y Ross, 2002). Varias son las ventajas de los métodos no destructivos que podemos enumerar entre ellas: la evaluación de piezas en su tamaño real, característica de importancia en materiales anisotrópicos como la madera, la portabilidad que permite evaluar piezas puestas en servicio y la buena correlación que estos métodos presentan con respecto al método de referencia (flexión estática en maquina universal) (Perez del Castillo *et al.*, 2000; O' Neill *et al.*, 2004; Acuña *et al.*, 2007; Carballo *et al.*, 2007; Collar *et al.*, 2009; De Cademartori *et al.*, 2014). Por todas estas razones los métodos no destructivos para determinar propiedades físico mecánicas de la madera, cada vez cobran mayor relevancia por su eficacia, menor costo, rapidez y sencillez. Estas herramientas acústicas son de uso común en países como Australia, Nueva Zelanda, Estados Unidos (Huang *et al.*, 2003) y en menor medida en Europa (Moore *et al.*, 2009). Entre estos métodos uno de los más utilizados es la técnica de resonancia acústica, basada en la frecuencia natural de vibración de la fibra de la madera, la cual ha conseguido el reconocimiento de la industria de estos países y es la que ha mostrado mejores resultados y aplicabilidad industrial (Santaclara y Merlo, 2013). En nuestro país los métodos no destructivos, acústicos y por vibración, para tipificar árboles en pie, rollizos, tablas y vigas iniciaron su aplicación en el plano investigativo a partir de 2008 (Fassola *et al.*, 2014) principalmente los estudios realizados han sido sobre coníferas, contando con escasa información sobre la aplicabilidad de los mismos en árboles, rollos y tablas de *Eucalyptus sp.* Por ello el objetivo de este trabajo fue determinar la utilidad de un método no destructivo, acústico por vibraciones longitudinales, para predecir el módulo de elasticidad en madera aserrada de *Eucalyptus grandis*.

2. MATERIALES y MÉTODOS

Se analizaron 70 piezas de madera aserrada de *Eucalyptus grandis* de 254 mm (1 pulgada) de espesor en diferentes largos y anchos. Los largos de tablas utilizados variaron entre 3,50 m (10 pies) y 1,22 m (4 pies) con una media de 2,74 m (9 pies), mientras que los anchos variaron entre 220 mm (8 pulgadas comercial) y 670 mm (3 pulgadas comercial) con una media de 139 mm (5 pulgadas comercial). El contenido de humedad medio de las tablas fue de 11,3% con valores máximos y mínimos de 7% y 15,5% respectivamente y un coeficiente de variación de 18,6%.

Las tablas evaluadas se tomaron de 8 árboles de una plantación comercial de 13 años de edad y un diámetro a la altura del pecho (dap) medio de 37 cm, ubicada en las cercanías de la ciudad de Concordia, provincia de Entre Ríos, Argentina. De cada árbol se extrajo un promedio de 6 rollos (hasta 15 cm en punta fina) de 3,5 m de longitud, luego de aserrar los mismos se seleccionaron al azar entre una y tres tablas de diferentes posiciones en cada rollo.

Determinación del módulo de elasticidad:

La determinación del módulo de elasticidad dinámico (MOEd) se realizó mediante un método no destructivo que se basa en el estudio y análisis de las vibraciones producidas en el material y la frecuencia propia del mismo. La mecánica del ensayo consiste en impactar con un martillo la pieza estudiada para producir vibraciones longitudinales. Para ello se utilizó el equipo *Portable Lumber Grader* (PLG) de la casa Fakopp® Enterprise. Este equipo permite estimar el módulo de elasticidad, la velocidad de propagación, la densidad de la madera y clasificar las tablas en clases resistentes según norma europea UNE-EN 338:2010 "Madera estructural, Clases resistentes". El cálculo del MOEd se realizó mediante la ecuación: $MOEd = (2 L f)^2 \rho$, donde L es el largo de la pieza, f es la frecuencia natural de vibración y ρ es la densidad de la pieza. La determinación del módulo de elasticidad estático (MOEe) fue determinado mediante maquina universal de ensayos, en probetas según las especificaciones de la norma UNE-EN 408:2011. De cada una de las 70 tablas, se extrajo una probeta. Las mismas presentaron un tamaño medio de 501 mm de largo (CV: 0,3%), por 129 mm de ancho (CV: 27,3%), por 23,5 mm de alto (CV: 2,3%). El contenido de humedad medio de las probetas fue de 11,8 % (CV: 3,9%) y el valor medio de densidad al 12% (normal) fue de 554 Kg/m³ (CV: 9,7%)

Clasificación de la madera:

El PLG provee como salida el grado estructural de cada pieza según la norma UNE-EN 338:2010 "Madera Estructural" la cual posee, en el caso de latifoliadas, 6 grados de calidad para usos estructurales, determinados por sus valores característicos de flexión, módulo de elasticidad y



densidad. Complementariamente en este estudio se analizaron los porcentajes de rechazos y clase de calidad estructural obtenidos.

Cuadro1. Valores característicos y grados de calidad estructural norma UNE-EN 338:2010

Propiedades resistentes	Clases resistentes					
	D30	D35	D40	D50	D60	D70
Flexión (N/mm ²)	30	35	40	50	60	70
Densidad (kg/m ³)	530	560	590	650	700	900
MOE (N/mm ²)	10000	10000	11000	14000	17000	20000

Análisis estadísticos:

Para determinar la asociación entre el MOEd calculado por método no destructivo y el MOEe determinado por máquina universal, se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson. El grado de predicción de la rigidez de la muestras se evaluó con análisis de regresión lineal tomando como variable predictora al MOEd y como variable respuesta al MOEe, con una probabilidad de error del 5%. La bondad de ajuste se estimó mediante el coeficiente de determinación (R^2)

Los análisis estadísticos se realizaron con los módulos de regresión lineal y análisis de la varianza del software InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2015)

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Cuadro 2, se puede observar el coeficiente de variación, los valores medios máximos y mínimos de las variables analizadas. Para el módulo de elasticidad los valores determinados mediante métodos no destructivos fueron un 2,6% superiores a los obtenidos con máquina universal de ensayos.

Cuadro 2. Valores medios, máximos, mínimos y coeficiente de variación para el módulo de elasticidad dinámico (MOEd), estático (MOEe), número de tablas analizadas (n).

Módulo de elasticidad	Variables descriptivas				
	Media	Máximo	Mínimo	Cv %	n
MOEd (N/mm ²)	13319	20300	5827	19,39	70
MOEe (N/mm ²)	12609	16846	7700	17,89	70

Módulo de Elasticidad

El coeficiente de correlación entre las variables MOEd y MOEe tuvo un valor de 0,85, estableciendo una fuerte asociación entre ambas variables.

El grado de predicción de la rigidez de la muestras se evaluó a partir de la regresión entre el MOEd calculado por método no destructivo y el MOEe calculado con máquina universal de ensayos. La bondad de ajuste del modelo se estimó mediante el coeficiente de determinación (R^2), de cual se obtuvo un valor igual a 0,74. Este resultado presenta valores inferiores a los encontrados por otros autores, 0,92 y 0,81 en *Eucalyptus grandis* (De Cademartori *et al.*, 2014); 0,84 y 0,85 en *Pinus taeda/elliottii* (Fank y Mastrandrea, 2015); 0,86 en Haya (Guntekin *et al.*, 2014); 0,94 en *Prosopis sp* (Sotomayor Castellanos, 2014). Acuña *et al.* (2005 y 2009) han encontrado diferencias significativas



en la determinación del módulo de elasticidad, al utilizar piezas de tamaño real y probetas libres de defectos y pequeñas dimensiones. El menor tamaño de las probetas utilizadas para determinar el MOEe posiblemente explique el menor coeficiente de determinación encontrado en este trabajo.

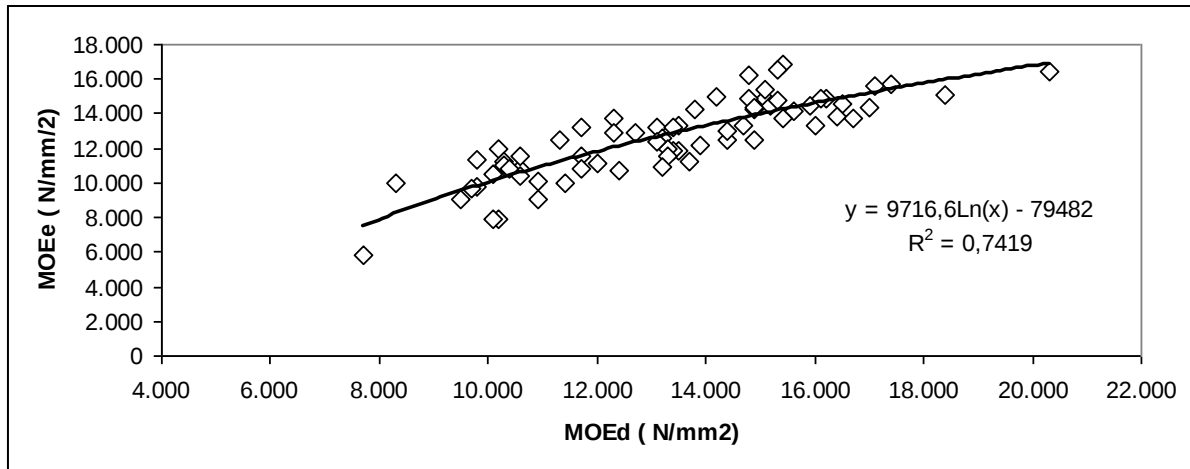


Gráfico 1. Curva ajustada y modelo para la predicción de MOEe

El modelo explica un 74 % de la variabilidad del MOEe, el p valor del análisis de la varianza es inferior a 0,05 (p valor = 0,0001), existiendo relación estadísticamente significativa entre ambas variables con un nivel de confianza del 95%.

El 56% de las tablas analizadas clasifica en alguna de las clases resistente establecidas por la norma UNE-EN 408:2011, con una composición porcentual para las distintas clases resistentes que se distribuyó de la siguiente manera: Clase D30: 20%; Clase D35: 18%; Clase D40: 14%; Clase D50: 4%. El 45 % restante de las tablas no clasificó, para usos estructurales.

4. CONCLUSIONES

Si bien el coeficiente de determinación obtenido fue menor a los obtenidos por otros autores, éste confirma la utilidad de los métodos no destructivos por vibración para la estimación de la rigidez de la madera aserrada.

Un mayor valor de coeficiente de determinación se podría obtener, si en maquina universal de ensayos se evaluara la pieza entera no una probeta de pequeñas dimensiones. Esta consideración debe ser tomada en cuenta para próximas evaluaciones

Los límites de clase impuestos por la norma UNE-EN 408:2011 son mas restrictivos para latifoliadas que para coníferas, donde existen clases inferiores de resistencia a D30. Así por ejemplo si consideráramos una clase resistente C18 (Densidad $> 380 \text{ kg/m}^3$ y $\text{MOE} > 9 \text{ kN/mm}^2$), solo el 4,3% de las tablas de este ensayo serían rechazadas

5. LITERATURA CITADA

- ACUÑA L., CASADO M., HERRAEZ G., DIEZ B., DIANA C., SANCHEZ DEL CAÑO V. 2009. Caracterización de la resistencia y rigidez a flexión de *Q. pyrenaica* Willd. según diversos métodos de ensayo. Actas 5 to Congreso Forestal Español. España. 10 p.
- ACUÑA L., DIEZ R., CASADO M., BASTERRA A., RAMON G., RELEA E. 2007. La técnica de transmisión ultrasónica aplicada a la madera estructural. Actas 11º Congreso Forestal Español de END. España. 11 p.
- ACUÑA L., LLORENTE A., CASADO M. 2005. Estudio comparativo entre normas de ensayo para madera de *Pinus sylvestris* L. en uso resistente. Actas IV congreso Forestal Español. España. 8 p.
- CARBALLO J, HERMOSO E, FERNÁNDEZ-GOLFÍN JI, CABRERO JC. 2007. Evaluación de técnicas vibratorias en la clasificación de la madera aserrada destinada a fines estructurales. In: Congreso Español de Ensayos No Destructivos. Actas. pp. 305- 316.



- COLLAR J.C, PRIETO E.H, BARRA R.D. 2009. Ensayos no destructivos sobre madera estructural. Una revisión de 30 años en España. Revista Forestal Kuru 6 (17): 1-16.
- DE CADEMARTORI P.E.G., MISSIO A.L., GATTO D.A., BELTRAME R. 2014. Prediction of the Modulus of Elasticity of *Eucalyptus grandis* Through Two Nondestructive Techniques. Floresta e ambiente.Brasil 21 (3):369-375.
- DI RIENZO J.A., CASANOVES F., BALZARINI M.G., GONZÁLEZ L., TABLADA M., ROBLEDO C.W. InfoStat versión 2015. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. Disponible en: <http://www.infostat.com.ar>
- FAKKOP ENTERPRISE. 2012. [en línea]: [Fecha de consulta Mayo de 2012]. Disponible en: www.fakkop.com .
- FANK P.Y., MASTRANDREA C.A. 2016. Validación de un método no destructivo para la determinación de la rigidez de tablas aserradas de pino resinoso (*Pinus elliottii* y *Pinus taeda*) cultivado en el nordeste de Argentina. Actas 17 Jornadas técnicas forestales y ambientales. Posadas, Argentina.
- FASSOLA H.E., VIDELA GALARET D., WINCK R.A., AREA M.C., CRECHI E.H., KELLER A.E., MAESTRI G., MASTROPAOLO J. 2014. Relación entre métodos acústicos con propiedades anatómicas y físico mecánicas de *Pinus taeda* L. sometido a raleos. Actas XVI Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales de Eldorado – Productos e Industrias Forestales. Argentina. 611- 618 p
- GEMMA R., BASTERRA A., CASADO M., ACUÑA L. 2005. Análisis de las técnicas de diagnóstico de madera estructural en edificios existentes y propuesta de integración orientada al proyecto. Actas I Jornadas de investigación en construcción, Tomo 1. Instituto de ciencias de la construcción “Eduardo Torroja”. Consejo superior de investigaciones científicas. España. 18 p.
- GUNTEKIN E., OZKAN S., YILMAZ T. 2014. Prediction of bending properties for beech lumber using stress wave method. Maderas. Ciencia y tecnología. 16 (1): 93-98, 2014. DOI 10.4067/S0718-221X2014005000008.
- HUANG C., LINDSTRÖM H., NAKADA R., RALSTON J. 2003. Cell wall structure and wood properties determined by acoustics. A selective review. Holz Roh-Werkst 61(5): 321-335.
- INTI-CIRSOC. 2013. Reglamento Argentino de Estructuras de Madera CIRSOC 601. Instituto Nacional de Tecnología Industrial. Buenos Aires. Argentina. 176p.
- IRAM 9544. 1973. Norma para métodos de determinación de densidad aparente en maderas. Instituto Argentino de Racionalización de materiales. 6 p
- MOORE J., LYON A., SEARLES G.,RIDLEY-ELLIS D. 2009. The use of acoustic-based NDT to predict the wood properties of UK-grown sitka spruce at different stages in the wood supply chain. Proceedings of 16th International Symposium on Nondestructive Testing and Evaluation of Wood. pp 65-70.
- O’NEILL H., TARIGO F., IRAOLA P. 2004. Propiedades mecánicas de *Pinus taeda* L. del norte de Uruguay. Informe nº 3. Grupo técnico de madera aserrada de pino “GT3”. Uruguay. 48 p
- PELLERIN R.F., ROSS R.J. 2002. Non destructive evaluation of Wood. Forest product society. USA. Publication Nº: 7250. ISBN 1-892529 -26 -2. 210 p
- PEREZ DEL CASTILLO O.F.A., CASTRO R., OHTA S. 2000. Ensayos de propiedades Mecánicas de *Pinus taeda* por seis métodos no destructivos. Informe de investigación Nº 1. Proyecto de Tecnología de ensayo de productos forestales. LATU-JICA (1998-2000). Uruguay. 24 p
- SANTACLARA O.E., MERLO S.E. 2013. Implicaciones financieras de la evaluación de calidad estructural de la madera sobre árboles en pie y trozas de *Pinus pinaster* mediante métodos no destructivos. 6to Congreso Forestal español, Junio 2013 Sociedad española de Ciencias forestales. España. 12 p.
- SOTOMAYOR CASTELLANOS, J.R. 2014. Caracterización mecánica de la madera con métodos no destructivos. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México. 339 p
- UNE – EN 408. 2011. Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas. AENOR, España.
- UNE-EN 338:2010 .Madera estructural. Clases de resistencia. AENOR, España.