

# DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE MEDICIONES DEL MODULO DE ELASTICIDAD “MOE” Y MODULO DE ROTURA “MOR” EN VIGAS LAMINADAS, POR ULTRASONIDO Y MAQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS

DETERMINATION OF THE CORRELATION BETWEEN MEASUREMENTS OF MODULUS OF ELASTICITY “MOE” AND MODULUS OF RUPTURE “MOR” ON LAMINATED BEAMS, USING ULTRASOUND AND UNIVERSAL TESTING MACHINE

Fecha de recepción:06/04/2015 // Fecha de aceptación: 21/12/2015

**Guillermo Gerardo Grabher;**  
**Elizabeth Weber;**  
**Obdulio Pereyra;**  
**Constantino Zaderenko**

Docentes de la Facultad de Ciencias Forestales, U.Na.M  
email:guillermograbher@yahoo.com.ar

## RESUMEN

En la Industria maderera existe la necesidad en contar con instrumentos que permitan conocer las propiedades mecánicas de la madera en forma rápida y confiable mediante ensayos no destructivos. Se realizó un estudio que permita comparar los valores obtenidos sobre vigas laminadas de *Pinus taeda* de producción local, con un equipo de ultrasonido Sylvatest con los de una Máquina Universal de Ensayos (MUE). El objetivo de este trabajo consiste en determinar la correlación estadística entre los resultados de ensayos no destructivos por ultrasonido y destructivos realizados en MUE. Se ensayaron 26 vigas laminadas tomadas al azar de las líneas de producción de industrias de la zona. El resultado del análisis estadístico de correlación permite concluir que las mediciones de Módulo de elasticidad (MOE) realizadas con Sylvatest poseen un

## ABSTRACT

There is a need in Wood Industry that is to count with instruments capable of measuring the mechanical wood properties in a rapid and reliable way by means of non destructive tests. A study which allows to compare the obtained values of *Pinus taeda* laminated beams of local production with an ultrasound Sylvatest equipment against those obtained with the Universal Testing Machine was carried out. The objective of this study was to determine the statistical correlation between the results of non destructive ultrasound tests and destructive tests conducted on a Universal Testing Machine. A total of 26 *Pinus taeda* laminated beams taken randomly from production lines of two industries of the region were tested. The result of the statistic analysis allows to conclude that the Measurements of Modulus of Elasticity (MOE) done with Sylvatest have an average determination coefficient of  $R^2 \sim 0,72$  compared with the measurements

coeficiente de determinación promedio de  $R^2 \sim 0,72$ , con respecto a las mediciones obtenidas en la MUE. El mismo análisis realizado para los valores de Módulo de rotura (MOR) con Sylvatest, son menores que con la MUE y también un coeficiente de determinación promedio igual a  $R^2 \sim 0,60$ .

**Palabras clave:** Ensayos destructivos y no destructivos, *Pinus taeda*, Vigas laminadas

obtained with the Universal Testing Machine. The same analysis done for Modulus of rupture gave measurements obtained with Sylvatest slightly lower to those obtained with the Universal Testing Machine and also an average coefficient of determination equals to ( $R^2 \sim 0,60$ ).

**Key words:** Destructive and not destructive tests, *Pinus taeda*, laminate Beams

## INTRODUCCIÓN

Observada la necesidad en la Industria de la Madera de contar con instrumentos que permitan obtener información rápida y confiable mediante ensayos no destructivos de las propiedades mecánicas de la madera y/o sus productos y teniendo en cuenta que los instrumentos que existen únicamente se encuentran adaptados a especies Europeas, se realizó un estudio que permite correlacionar los valores obtenidos con el “Sylvatest” que posee la Facultad de Ciencias Forestales con los obtenidos en la Máquina Universal de Ensayos, este último mediante ensayos destructivos.

Para ello se determinó los valores de Modulo de Elasticidad “MOE” y Modulo de Rotura “MOR” de vigas laminadas con ambos instrumentos y/o máquinas, para posteriormente establecer la correlación existente entre los mismos.

El Sylvatest es un equipo medianamente conocido y sofisticado, realiza mediciones mediante ultrasonido, que permite determinar valores de MOE y MOR, con escalas referidas a especies europeas como ser Oak, Spruce, Fir, Pine, (Roble, Piceas, Abeto, Pino), cuando se lo quiere utilizar con especies de la región, surge la duda de los resultados que arroja, debido a que las especies no son de las mismas características, lo que nos obliga a los efectos de poder confiar en los resultados, realizar previamente trabajos que permitan correlacionar entre valores arrojados por una Máquina Universal de Ensayos (Valores reales y confiables) y aquellos que arroja el Sylvatest.

El objetivo de este trabajo fue determinar la correlación entre los resultados de ensayos no destructivos por ultrasonido y ensayos destructivos de la máquina universal.

En la actualidad uno de los productos de madera que esta muy difundido desde el punto de vista estructural, son las vigas multilaminadas, según (DEMKOFF, 2003) las denomina también, madera laminada encolada (MLE) y las define como: piezas de sección transversal rectangular de ancho fijo y altura constante o variable y de eje recto o curvo, constituidos por láminas o tablas unidas en forma irreversible con un adhesivo específicamente

formulado. El espesor normal de las láminas varía entre 20 y 45 mm. Los elementos de madera laminada encolada no deben contener, bajo ninguna circunstancia, clavos o grapas como elementos vinculantes de las tablas. El encolado es la vinculación más efectiva, no acarrea disminución de sección y su efectividad aumenta en algunos casos la resistencia nominal de las secciones. La altura de los elementos de vigas o arcos puede ser constante o variable, y su dimensión en largo esta limitada solo por las posibilidades de transporte.

La evaluación a través de ensayos no destructivos por técnicas acústicas y de ultrasonido han sido estudiadas y analizadas por más de 30 años. En el estudio de (FUENTEALBA y BARADIT 2000) cita los antecedentes sobre el uso de estas técnicas como el de: Detección de Fracturas: Grietas internas (DEBAISE, 1966); Caracterización del material: determinación de constantes elásticas (BUCUR, 1995; PREZIOSA 1981, HEARMON, 1956) y estudio de la anisotropía (BUCUR, 1984); Calidad de madera: detección de nudos, clasificación de la madera, densidad; Deterioración de la madera: daño por hongos y termitas (BEALL y WILCOX, 1987), Calidad de unión: estudio de la unión adhesiva en vigas laminadas (REIS, 1990), Fraguado de adhesivos: monitoreo del fraguado de adhesivos in situ (BEALL, 1987, 1996).

Hoy en día existe la necesidad de desarrollar técnicas de evaluación no destructivas de maderas y compuestos de madera con la finalidad de asegurar la integridad de un amplio rango de materiales. La utilización de estas técnicas pueden ser muy útiles para obtener información necesaria para el diseño y rendimiento de estructuras de madera, reduciendo costos y riesgos de uso final (SANDOZ, 1989).

Con el fin de encontrar nuevas técnicas que sean más eficientes en términos de costos, confiabilidad y tiempos más cortos de obtención de resultados, se hace indispensable conocer las propiedades de la madera por métodos convencionales de modo de poder decidir, comparar y concluir respecto a la nueva alternativa propuesta. El parámetro más utilizado y conocido es el módulo de elasticidad del ensayo de flexión. La determinación de la elasticidad de ensayos de compresión es muy poco utilizada, debido tanto a los costos involucrados como a la complejidad del ensayo.

Según (O'NEILL, 2004) la tendencia mundial está orientada hacia la evaluación mecánica no destructiva. En la actualidad existen muchos equipos y metodologías no destructivas para la estimación de las propiedades físico mecánicas de la madera, en árboles en pie, en trozas, en rollizos o columnas, como también en vigas, tirantes y tablas. Algunos funcionan mediante la medición de la velocidad de ondas inducidas por impacto o por ultrasonido, otros por frecuencia vibración longitudinal, también por la extracción de tarugos de 12 mm y por penetración de un émbolo en la madera. En la siguiente tabla 1 (O'NEILL 2004) presenta para *Pinus taeda*, el coeficiente de correlación (r) entre los valores de módulo de elasticidad determinado mediante el ensayo de flexión estática en máquina universal (método de referencia) y los valores resultantes de los ensayos no destructivos en distintas condiciones.

La alta correlación que existe entre el método destructivo y los métodos no destructivos nos permite afirmar que estos métodos son aptos para la estimación de la calidad de madera para uso estructural.

BALLARIN, A. W.; NOGUEIRA, M. 2002, presentan la correlación lineal entre MOE obtenido por ultrasonido y MOE obtenido en la Máquina Universal de Ensayos para tres especies de *Eucaliptus*.

## MATERIALES Y MÉTODOS

En el desarrollo del presente trabajo se utilizaron los siguientes materiales: taladro manual; Xilohigrometro (Medidor de humedad por contacto); Calibre y cinta métrica.

### Vigas Laminadas

Se ensayaron 26 vigas laminadas de *Pinus taeda*, 16 de ellas con una escuadría nominal de 3" x 6" x 10' (75 x 155 x 3000 mm) y las otras 10 con

escuadría nominal de 3" x 5" x 10' (75 x 140 x 3000mm) de carácter comercial obtenidas por donación de empresas de la zona que elaboran este tipo de producto.

El adhesivo utilizado en las 16 primeras vigas es vinílico tipo D3 en las uniones finger y una combinación de urea melamina en las uniones de láminas, en las 10 restantes se utilizó adhesivo tipo Resorcinol.

### Sylvatest

Es un equipo que permite a través del ultrasonido, la clasificación de la madera según sus propiedades mecánicas. Es de origen Suizo y fue desarrollado por IBOIS (Instituto Federal de Tecnología de Suiza).

Este equipo tiene 2 cables de prueba (Figura 1). Dos de las salidas consisten en transductores piezoeléctricos, donde uno genera la onda a una frecuencia de 22 kHz ("sender") y el otro recibe la onda transmitida ("receiver"). Empleando el microprocesador se pueden realizar las mediciones, y los distintos parámetros (especie, tipo de sección y largo de la tabla) se pueden seleccionar con mucha facilidad.

Para conseguir el perfecto acoplamiento con la madera se efectúan orificios de 5 mm de diámetro y 10 mm de profundidad haciendo uso de una broca especial.

### Máquina Electromecánica Universal de Ensayos (MUE)

Modelo 10407030 de procedencia Italiana fabricante DIDACTA, calibrada según Norma UNE, posee una capacidad de 300kN de fuerza accionada por un sistema electromecánico. (Figura 2).

**Tabla 1: Correlación entre MOE Máquina Universal de Ensayos y MOE equipos de ensayos no destructivos**  
**Table 1: Correlation between Modulus of Elasticity with Universal Testing Machine and Modulus of Elasticity with non destructive testing equipments.**

Máquina Universal Tablas secas	Fckapp			Sylvatest			FFT Analyzer		
	En árbol en pie	Tablas o vigas		En árbol en pie	Tablas o vigas		En trozas	Tablas o vigas	
		Verdes	Secas		Verdes	Secas		Verdes	Secas
Correlación (r)	0,855	0,823	0,916	0,878	0,826	0,932	0,830	0,930	0,957

Fuente: O'NEILL, 2004



**Figura 1: Equipo ultrasonido Sylvatest**  
**Figure 1: Sylvatest ultrasound equipment**



**Figura 2: Máquina Electromecánica Universal de Ensayos**  
**Figure 2: Electromechanic Universal Testing Machine.**

Se identificaron las vigas a través de un código definido y con la ayuda de un medidor de humedad electrónico se determinó el contenido de humedad de cada pieza, obteniéndose un promedio de 12 % de las vigas, los ensayos para determinar la resistencia a la flexión en las vigas multilaminadas fueron realizados en 2 etapas:

**Etapas 1:** Correspondiente al ensayo no destructivo mediante ultrasonido utilizando el equipo Sylvatest.

Se realizaron las perforaciones necesarias en las vigas según lo indican las instrucciones del mencionado equipo combinando varias posiciones de los sensores (Figura 2), luego se procedió a realizar

las mediciones utilizando la especie “Pino” predefinida en el Sylvatest y en cada caso el tipo de medición “Directa” o “Indirecta” según correspondiera, se almacenaron los valores de MOE y MOR en la memoria del equipo y, además, se tabularon en forma manual.

**Etapas 2:** Correspondiente a la Máquina Electromecánica Universal de Ensayos

Se montaron los elementos auxiliares para este tipo de ensayo “flexión estática puntual” en la máquina, según norma UNE 408, luego se procedió a ensayar las vigas almacenando los datos y gráficos obtenidos en la PC comando del mencionado equipo, además los valores necesarios fueron tabulados manualmente.

Posteriormente los resultados de los ensayos realizados en ambos equipos fueron procesados por software estadístico obteniéndose de un análisis de regresión el grado de asociación entre ambas metodologías de ensayo.

## RESULTADOS

Los resultados obtenidos de valores de MOE y MOR, para cada una de las vigas multilaminadas, fueron registrados, según sean, en la Máquina Universal de Ensayos o con el Sylvatest.

En los datos del Sylvatest, para cada viga se han obtenido 4 resultados, que están definido por la posición de los sensores dispuestos (a,b,c,d).

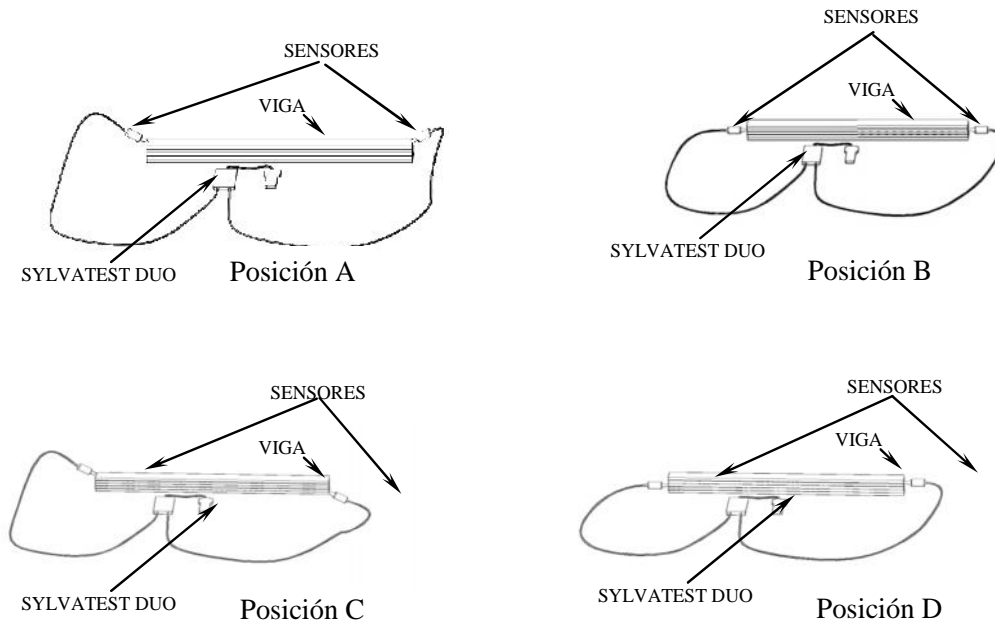
Para el caso de los resultados de los ensayos en la Máquina Universal de Ensayos, se toma un solo valor de MOE y MOR por cada viga, ya que son ensayos destructivos.

En la siguiente Tabla 1 se observa en resumen los datos correspondientes a cada posición de los sensores del Sylvatest y de la Máquina Universal de Ensayos.

Del análisis de los resultados se puede observar que los mismos son valores que se encuentran dentro de los estándares para estas especies.

Para determinar la correlación entre los valores en los 2 tipos de ensayos, se han procesado los mismos en un software estadístico, obteniéndose los gráficos de correlación (Gráfico 1 ejemplo de una correlación)

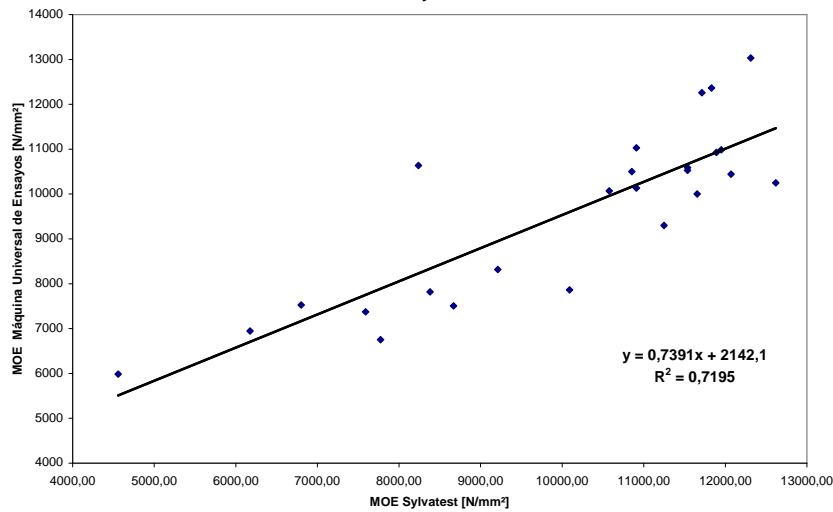
En la Tabla 2 se exponen los resultados de los coeficientes de determinación y de correlación obtenidos en el análisis de los datos.



**Figura 1: Distintas posiciones de los sensores del Sylvatest para la medición**  
**Figure 1: Different positions of Sylvatest sensors for measurement.**

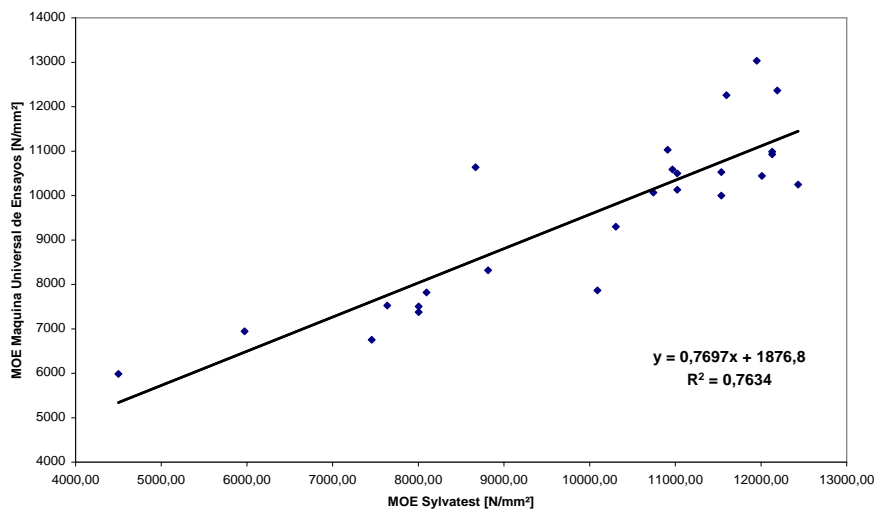
**Tabla 1: Resumen de datos de las posiciones de los sensores del Sylvatest y Máquina Universal de Ensayos**  
**Table 1: Data summary of the positions of the Sylvatest sensors and the Universal Testing Machine.**

	Sylvatest								Máquina Universal de Ensayos	
	Posición A		Posición B		Posición C		Posición D		MOE [N/mm <sup>2</sup> ]	MOR [N/mm <sup>2</sup> ]
	MOE [N/mm <sup>2</sup> ]	MOR [N/mm <sup>2</sup> ]	MOE [N/mm <sup>2</sup> ]	MOR [N/mm <sup>2</sup> ]	MOE [N/mm <sup>2</sup> ]	MOR [N/mm <sup>2</sup> ]	MOE [N/mm <sup>2</sup> ]	MOR [N/mm <sup>2</sup> ]		
<b>Mínimo</b>	4500,00	8,00	4558,26	8,00	4500,00	8,00	4500,00	8,00	5986,14	32,60
<b>Máximo</b>	12681,27	32,66	12619,11	32,42	11949,96	29,76	12433,98	31,68	12362,96	74,00
<b>Promedio</b>	9635,45	21,15	10044,02	22,55	9434,20	20,46	9988,98	22,38	9565,46	50,75
<b>Desvío</b>	2484,80	8,82	2191,10	7,92	2381,59	8,19	2167,14	7,73	1909,12	14,27
<b>CV %</b>	0,26	0,42	0,22	0,35	0,25	0,40	0,22	0,35	0,20	0,28



**Gráfico 1: Correlación entre MOE Máquina Universal de Ensayos y MOE en posición B de los sensores del Sylvatest.**

**Graph1: Correlation between Modulus of Elasticity with Universal Testing Machine and Modulus of Elasticity in B position of Sylvatest sensors.**



**Gráfico 2: Correlación entre MOE Máquina Universal de Ensayos y MOE en posición D de los sensores del Sylvatest.**

**Graph 2: Correlation between Modulus of Elasticity with Universal Testing Machine and Modulus of Elasticity in D position of Sylvatest sensors.**

**Tabla 2: Resultados de coeficientes de determinación (R²) y de correlación (r) obtenidos**  
**Table 2: Determination Coefficients Results (R²) and obtained correlation results (r)**

Correlación entre	Ecuación	Coficiente Determinación (R²)	Coficiente Correlación (r)
MOE Maquina Universal de Ensayos y MOE en posición A de los sensores del Sylvatest.	$y = 0,641x + 3389,5$	0,696	0,834
MOE Maquina Universal de Ensayos y MOE en posición B de los sensores del Sylvatest.	$y = 0,7391x + 2142,1$	0,7195	0,848
MOE Maquina Universal de Ensayos y MOE en posición C de los sensores del Sylvatest.	$y = 0,6826x + 3125,8$	0,7251	0,852
MOE Maquina Universal de Ensayos y MOE en posición D de los sensores del Sylvatest.	$y = 0,7697x + 1876,8$	0,7634	0,874



Continuación Tabla 2

Correlación entre	Ecuación	Coefficiente Determinación (R <sup>2</sup> )	Coefficiente Correlación (r)
MOR Máquina Universal de Ensayos y MOR en posición A de los sensores del Sylvatest.	$y = 1,1861x + 25,666$	0,5371	0,733
MOR Máquina Universal de Ensayos y MOR en posición B de los sensores del Sylvatest.	$y = 1,4066x + 19,033$	0,6083	0,780
MOR Máquina Universal de Ensayos y MOR en posición C de los sensores del Sylvatest.	$y = 1,3452x + 23,231$	0,5954	0,772
MOR Máquina Universal de Ensayos y MOR en posición D de los sensores del Sylvatest.	$y = 1,4993x + 17,206$	0,6584	0,811

En los distintos gráficos y en la Tabla 2 se observa que los coeficientes de correlación (r) para MOE son inferiores a los que se observan en la bibliografía. Así por ejemplo O'NEILL trabajando con vigas macizas, presenta para *Pinus taeda*, el coeficiente de correlación (r) de 0,932 a diferencia del presente trabajo donde se utilizaron vigas multilaminadas.

El mejor de los valores de correlación obtenidos en este caso corresponde a la posición D de los sensores del Sylvatest con un valor de  $r = 0,874$ , al igual que para MOR con 0,811. Recordemos que la posición D de los sensores era aquella en forma directa pero ubicando los sensores en laminas distintas.

Si asumimos como regresiones satisfactorias las que poseen un R<sup>2</sup> de  $> 0,72$  como presentan BALLARIN, A. W.; NOGUEIRA, M. y comparamos los resultados de la correlación lineal entre MOE obtenido por ultrasonido y MOE obtenido en la Máquina Universal de Ensayos para tres especies de *Eucaliptus*, podemos observar que se tienen valores inferiores a los presentados por estos, pero superiores al mínimo sugerido.

## CONCLUSIONES

Los valores obtenidos del método de estimación no destructivo fueron analizados mediante software, se observó una buena correlación entre la estimación por este método y el de referencia, ensayo de Flexión Estática en Máquina Universal de Ensayos.

El análisis de los resultados permite concluir que las mediciones de MOE hechas en vigas multilaminadas producidas en la región poseen un promedio en coeficiente de determinación, (R<sup>2</sup> ~ 0,72) con las mediciones de la Máquina Universal de Ensayos, el cual se considera aceptable.

Los valores de obtenidos con el Sylvatest de MOR fueron más bajos (~50%) que con la Máquina Universal y también un coeficiente de determinación promedio menor, (R<sup>2</sup> ~ 0,60).

Se debe destacar que existe aproximaciones en los coeficientes R de MOE y de MOR, para las

distintas posiciones adoptadas para los sensores de ultrasonido lo que indica que las mediciones no son afectadas por la disposición de los mismos. Se demostró que no hay diferencias significativas entre las distintas posiciones. Esto elimina la posibilidad de incidencia de este factor en los resultados.

Se considera importante en el equipo Sylvatest, adecuar el algoritmo del software para el pino de Misiones, para lo cual se deberían utilizar datos de velocidad, longitud de onda y pico de onda obtenidos en los ensayos efectuados.

Se recomienda realizar ensayos de este tipo con un número mayor de muestras.

## BIBLIOGRAFÍA

SANDOZ, J.L. 1989. Grading of construction timber by ultrasound. Wood Science and Technology, 23, pp. 95-108.

SANDOZ, J.L.; Benoit, Y. y Demay, L. 2000. Wood testing using acousto-ultrasonic, 12th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, pp. 97-104.

BALLARIN, A. W.; Nogueira, M. 2002. Correlações entre módulos de elasticidade estático (flexão) e dinâmico (ultrason) para algumas espécies de eucalipto Universidade Estadual Paulista; Brasil. (mnogueira@fca.unesp.br; awballarin@fca.unesp.br)

FUENTEALBA Cecilia, ERIK BARADIT A. 2000. Determinación de las Constantes Elásticas de la Madera por Ultrasonido. Parte I: Módulos de Elasticidad y Módulos de Rigidez. Departamento de Ingeniería en Maderas, Facultad de Ingeniería, Universidad del Bío – Bío, Chile

HERMOSO PRIETO, Eva; Fernández-Golfín Seco, Juan I.; Díez Barra, M. Rafael y Rafael Mier Pérez. 2007. Aplicación de los ultrasonidos a la evaluación de las propiedades mecánicas de la madera en rollo de pequeño diámetro

CASADO, M.; Acuña, L.; Vecilla, D.; Basterra, A. y E. Pando V. Relea. 2007. Determinación de la capacidad resistente de madera Estructural de *Pinus sylvestris* mediante PLG.

SANDOZ, Dr. Jean-Luc. 2006. Acousto-Ultrasonic non-destructive evaluation of historical wooden structures CBS – Concepts Bois Structure, Les Ecorces, France

SANDOZ JEAN-LUC, Benoit Yann. 2007. Timber grading machine using multivariate parameters based on ultrasonic and density measurement CBT SA, Rue des Jordils 40, 1025, Saint Sulpice, Switzerland

O'NEILL Hugo. 2004. Estimación de la calidad de la madera producida en el Uruguay para uso estructural y su evaluación en servicio por métodos no destructivos.

SANDOZ J. L. , Benoit Y. , Demay L. 2000. Wood testing using Acousto-ultrasonic

DEMKOFF, Miguel L.V . 2003. Vigas laminadas estructurales de madera, su fabricación y empleo. Concordia Entre Ríos Argentina.