

ESTIMACIÓN DE LA CALIDAD DE LA MADERA PRODUCIDA EN EL URUGUAY PARA USO ESTRUCTURAL Y SU EVALUACIÓN EN SERVICIO POR MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

Per. Agr. Hugo O'Neill

Consultor Departamento de Proyectos Forestales LATU

En el Uruguay existe según la Dirección General Forestal del M.G.A.P una superficie forestada bajo Proyecto del orden de 616.000 hectáreas hasta el año 2002; de esta superficie ocupan aproximadamente un 25 % las plantaciones de *Eucalyptus grandis*, un 19 % las de *Pinus taeda* y un 7 % las de *Pinus elliottii*. Gran parte de esta superficie ha sido manejada y se está cosechando con destino de madera aserrada para uso estructural (Tablas, vigas, tirantes, columnas) y también para otros usos como partes de muebles, revestimientos de pisos, paredes, etc.

Esta presentación pretende difundir los conocimientos existentes en nuestro país sobre las características mecánicas de las maderas de las especies antes mencionadas y también de las metodologías comprobadas y prácticas utilizadas para estimar la calidad de la madera en forma temprana y no destructiva, en la plantación, en el procesamiento industrial y en la clasificación mecánica, como también en elementos de madera en servicio.

La importancia de la evaluación temprana de la calidad de la madera, radica en que es una buena herramienta en el momento de raleo y de definir el turno final de cosecha, decisiones que dependerán del destino de la madera a producir.

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. Estos equipos y la tecnología están disponibles desde hace unos seis años en nuestro país.

1. Estimación de la calidad de la madera de árboles en pie

Como instrumento en la evaluación temprana de la calidad de la madera para uso estructural de árboles en pie, es posible la utilización de equipos no destructivos como el Fakopp y el Sylvatest para estimar el módulo de elasticidad (MOE), propiedad que permite optimizar los manejos silviculturales (Podas, raleos, etc). El Pilodyn, permite por medio de la penetración de un émbolo determinar la dureza y por ende la densidad. El extractor de tarugos de 12 mm de diámetro (C.S.I.R.O. Australia) nos permite determinar diferentes propiedades físicas como la densidad, la longitud de las fibras, el ángulo de inclinación de las microfibrillas en las fibras, la contracción radial y tangencial, etc.



Figuras N° 1 y 2: Evaluación de la calidad de la madera de árboles en pie, equipos Sylvatest y Fakopp

2. Estimación de la calidad de la madera de trozas, columnas, vigas, tirantes y tablas

Se mencionó anteriormente la tendencia mundial en la clasificación de la madera aserrada por resistencia mecánica, es mediante métodos no destructivos conocidos en inglés como “Mechanical Stress Rated Lumber” (MSR). La utilización de estos métodos nos permite instrumentar categorías o grados estructurales para el uso seguro y eficiente de muestras maderas con estos fines. Para esta evaluación de la resistencia mecánica mediante la estimación del módulo de elasticidad es posible utilizar equipos no destructivos como Fakopp, Sylvatest, Pundit y el FFT Analyzer (Figura N° 3). Con el conocimiento de la resistencia mecánica de la madera es posible clasificarla, optimizando el proceso industrial para la obtención de madera apta para uso estructural. Realizando esta clasificación antes del secado industrial de la madera, podremos optimizar también el secado, proceso de alto costo en la cadena industrial.



Figura N° 3: Evaluación de la calidad de madera aserrada (FFT Analyzer)

3. Estimación de la calidad de la madera en servicio

Varias de las herramientas no destructivas mencionadas anteriormente (Fakopp, Pundit y Sylvatest) nos permiten también realizar una evaluación y seguimiento de la resistencia mecánica de la madera en servicio, (componente de una vivienda, una estructura o un puente, etc), madera que es sometida a diferentes agentes climáticos, biológicos (Hongos, insectos, etc.), químicos y a la utilización en el tiempo. (Ver figuras N° 4 y 5)



Figuras N° 4 y 5 : Evaluación madera en servicio, uso de equipo Fakopp en la estructura de un puente.

4. El conocimiento de las características de las maderas producidas en el Uruguay

Las características mecánicas de las maderas producidas en nuestro país vienen siendo estudiadas y caracterizadas desde hace varios años por el Sector Productos Forestales del LATU, con énfasis en el *Eucalyptus grandis* y en *Pinos taeda* y *elliotti*. Se han realizado 12 muestreos (de 30 árboles) de diferentes regiones, edades y orígenes de semilla. Se han analizado la variación entre árboles de un mismo rodal, la variación en el radio entre madera juvenil y adulta y también la variación en la altura hasta 12 metros.

Se realizaron ensayos mecánicos no destructivos en trozas, en tablas de tamaño de uso real 2"x 6" en estado verde y seco a 12 % CH. (260 vigas por muestreo) y destructivos en ensayo de flexión estática en máquina universal en vigas o tablas de 2" x 6" y también en pequeñas probetas libres de defectos. Los ensayos de flexión estática realizados mediante máquina universal son el respaldo y referencia de los ensayos no destructivos realizados. También se estudiaron las relaciones, desviaciones y variaciones entre los distintos métodos y las distintas propiedades físicas y mecánicas.

4.1 Evaluación de la calidad de la madera para uso estructural mediante ensayos no destructivos

A modo de ejemplo de la aplicabilidad de los ensayos no destructivos mostramos a continuación los resultados del trabajo realizado en *Eucalyptus grandis* de 26 años de edad proveniente de la zona centro de nuestro país, sobre un muestreo de 18 árboles, en

trozas basales y en tablas próximas a la corteza (zona donde se realizaron los ensayos no destructivos en pie). Se estimó el módulo de elasticidad en árboles en pie con dos equipos, el Fakopp y el Sylvatest, en trozas el FFT Analyzer y en tablas o vigas verdes y secas a 12 % de Contenido de Humedad el Fakopp, el Sylvatest y el FFT Analyzer, también en tablas o vigas secas se realizó el ensayo de flexión estática normalizado, en máquina universal se determinó el módulo de elasticidad, el cual utilizamos como método de referencia para los ensayos no destructivos. (Cuadro N° 1)

Cuadro N° 1: Módulo de Elasticidad promedio (MPa) y Coeficiente de Variación (%)

Máquina Universa l Tablas secas	Fakopp			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
12948	11460	11185	14929	15213	14969	17038	10700	12593	14707
14,7	10,2	15,3	13,2	11,6	16,5	14,0	13,0	14,8	14,7

En el siguiente gráfico (N° 1) vemos los valores de MOE promedio por equipo de ensayo no destructivo y por tipo y condición. Utilizamos en este gráfico como referencia el ensayo mecánico para determinar el MOE en máquina universal. Existen valores promedio inferiores y superiores al valor de referencia. Podemos observar que para un mismo equipo el valor promedio de MOE aumenta cuando disminuye el contenido de humedad. Debemos decir también que en el momento de la elección de un equipo no destructivo para estimar el MOE tenemos que optar por el que tenga valores más próximos al de referencia (MOE Máquina Universal), en este estudio los valores promedio más cercanos para vigas secas son los de el Fakopp (15,3 %) y el FFT Analyzer (13,6 %).

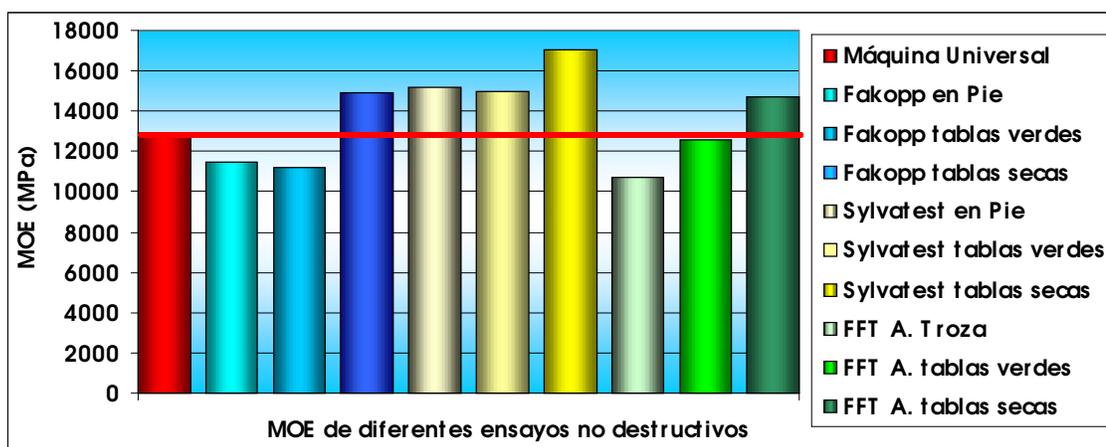


Gráfico N° 1: Valores promedio de MOE de ensayos no destructivos y Máquina Universal

En el siguiente cuadro N° 2 podemos ver 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.

Cuadro N° 2: Correlación entre MOE Máquina Universal y MOE equipos de ensayos no destructivos

Máquina Universal Tablas secas	Fakopp			Sylvatest			FFT Analyzer		
	En árbol en pie	Tablas o vigas		En árbol en pie	Tablas o vigas		En trazos	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

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.

Consideramos importante mencionar que los valores de MOE promedio obtenidos por medio de métodos no destructivos tienden a ser superiores a los del método de referencia (Máquina Universal) y varían según el equipo y la condición con que se realiza la estimación. Observamos que los mejores coeficientes de correlación se dan en ensayos en las mismas condiciones de humedad que el método de referencia. En el siguiente gráfico (N° 2) vemos que si bien existe una muy buena correlación ($r = 0,916$) entre los valores obtenidos por medio del Fakopp a 12 % de contenido de humedad y los obtenidos en la misma condición en máquina universal, existe en este caso una diferencia en más entre los valores promedio del orden del 15,3 % a favor del ensayo no destructivo.

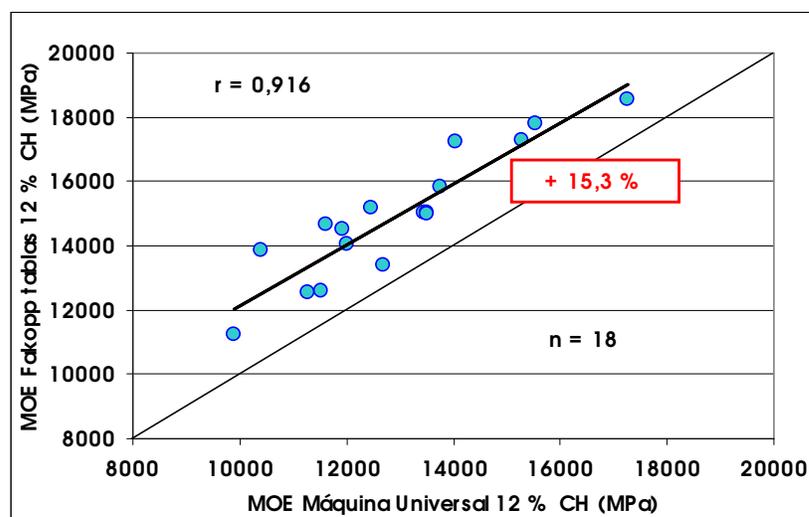


Gráfico N° 2: Relación entre el MOE Fakopp y MOE Máq. Universal
– Diferencia porcentual entre los valores promedio

De lo expuesto anteriormente podemos decir que para la utilización de estos equipos no destructivos tenemos que tener en cuenta esta diferencia en más de los valores obtenidos para trabajar con márgenes aceptables de seguridad.

4.2 Características mecánicas de Pinos y Eucalyptus implantados en el Uruguay

Consideramos de suma importancia la difusión de los conocimientos de las características mecánicas de las maderas producidas en nuestro país con destino al aserrío y su posible uso en la construcción como madera estructural.

A modo de ejemplo mostraremos los resultados de Módulo de Elasticidad (MOE) y de Módulo de Rotura (MOR) de dos especies que ocupan una importante área forestada, el *Pinus taeda* L. (24 años, del Litoral) y el *Eucalyptus grandis* H. (12 años, del Norte). Estos resultados fueron determinados mediante el ensayo de flexión estática en máquina universal sobre tablas o vigas de 50 mm x 150 mm x 2800 mm, con un contenido de humedad entre 10 y 12 %, obtenidas de tres alturas del árbol hasta los 12 m. y de tres posiciones en ancho del radio. En el caso del pino estos resultados no incluyeron las vigas que contenían médula ya que sabemos que por sus características no son aptas para el uso estructural.

Cuadro N° 3: Valores de MOE Y MOR promedio de Flexión Estática en Máquina Universal

	<i>Pinus taeda</i> L.		<i>Eucalyptus grandis</i> H.	
	MOE (MPa)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	MOR (MPa)
Número	141	141	203	203
Promedio	8354	37,9	11607	50,6
C. V. (%)	20,9	42,3	14,3	27,5

Partiendo de estos resultados obtenidos podemos realizar la clasificación estructural de la madera estudiada, para esta clasificación utilizamos la norma “JAS” (Japan Agricultural Standard) para madera de coníferas de uso estructural. Dicha norma establece que todos aquellos elementos de madera que superen la categoría E 70 o sea un valor de MOE superior a 7850 MPa son aptos para el uso estructural en la construcción. En los cuadros N° 4 y 5, y en los gráficos N° 3 y 4 podemos ver el porcentaje de las tablas o vigas que pertenecen a cada categoría estructural, de cada especie analizada. En el caso de *Pinus taeda* un 55,2 % de las vigas no calificarían como madera para uso estructural y un 43,8 % sí califica. En el caso del *Eucalyptus grandis* solamente una viga (0,5 %) no califica y sí lo hacen el resto de las vigas un 99,5 %. Además de la diferencia porcentual entre las dos especies podemos también observar que en el caso del *E. Grandis* un 78,3 % de las vigas se concentran en las categorías E 110 y E 130, esto sugiere que tienen una sobrada performance para el uso estructural, en el caso del pino solamente 11,3 % lo hace en la categoría E 110.

**Cuadro N° 4: Porcentaje de tablas según categorías estructurales JAS
– *Pinus taeda* L.**

Categoría JAS	MOE 10 ³ kgf/cm ²	MOE Máquina Universal (MPa)	Promedio Tablas	
			Cantidad (212)	Porcentaje (%)
<E 50			2	0,9
E 50	40-60	3920-5880	28	13,2
E 70	60-80	5880-7850	89	42,0
E 90	80-100	7850-9810	63	29,7
E 110	100-120	9810-11770	24	11,3
E 130	120-140	11770-13730	6	2,8

**Cuadro N° 5: Porcentaje de tablas según categorías estructurales JAS
– *E. grandis* H.**

Categoría JAS	MOE 10 ³ kgf/cm ²	MOE Máquina Universal (MPa)	Promedio Tablas	
			Cantidad (203)	Porcentaje (%)
< E 50		< 3920	0	0
E 50	40 – 60	3920 – 5880	0	0
E 70	60 – 80	5880 – 7850	1	0,5
E 90	80 – 100	7850 – 9810	26	12,8
E 110	100 – 120	9810 – 11770	89	43,8
E 130	120 – 140	11770 – 13730	70	34,5
E 150	140 – 160	13730 – 15690	14	6,9
> E 150	> 160	> 15690	3	1,5

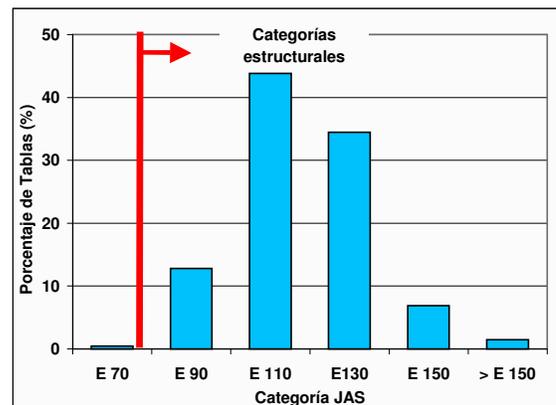
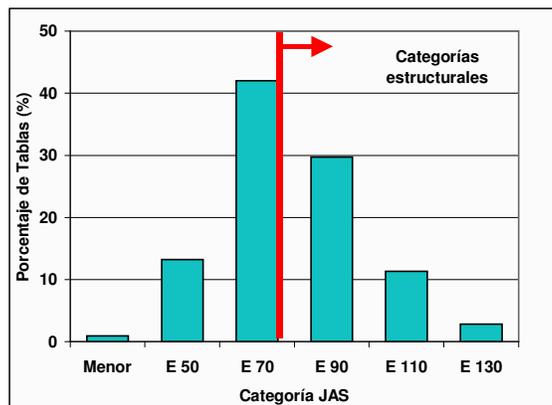


Gráfico N° 3 y 4: Porcentaje de tablas aptas para uso estructural de *Pinus taeda* y *Eucalyptus grandis*

De los cuadros y gráficos anteriores podemos decir también que en el caso del pino la influencia de la presencia de madera juvenil en la zona cercana a la médula, hace que las tablas procedentes de esta zona no sean aptas para uso estructural, en cuanto al eucalyptus esta influencia no es tan notoria, lo que permite un mejor comportamiento desde el punto de vista estructural.

5. Conclusiones

- Existe en nuestro país la tecnología y el equipamiento para la estimación no destructiva de la calidad de la madera para uso estructural, desde el principio del ciclo de la producción (árbol en pie), para la madera en los distintos procesos industriales y también para la madera en servicio.
- Los métodos de estimación no destructiva fueron estudiados y comprobados, se observó una buena correlación entre la estimación por estos métodos y el método de referencia ensayo de Flexión Estática normalizado en Máquina Universal.
- Las características mecánicas de las maderas producidas en el Uruguay vienen siendo estudiadas desde hace varios años por el Sector Productos Forestales del LATU. Se han realizado una docena de muestreos de Pinus y Eucalyptus del norte, del litoral, del centro y del sur de nuestro territorio.
- Pensamos que existe información suficiente en nuestro país para comenzar a trabajar en la normalización y en la codificación de la madera nacional y poder utilizarla en forma eficiente y segura en la construcción.
- Debemos tener en cuenta la presencia de madera juvenil en el uso de la madera con fines estructurales en la construcción.

6. Bibliografía

1. TUSET, R.; DURÁN, F./ Manual de maderas comerciales, equipos y procesos de utilización, Editorial Hemisferio Sur, 1986.
2. CORONEL, E./ Fundamento de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas. Universidad Nacional de Santiago del Estero, 1994.
3. OHTA, S.; WATANABE, H./ Mechanical Properties of juvenile wood in the stem of Hinoki (*Chamaecyparis obtusa*), Japan Wood Research Society, 1968. 14 (5).
4. NAGAO, H.; NAKAI, T.; TANAKA, T./ Non destructive evaluation of bending a tensile strength by longitudinal and transverse vibration of lumber, *Eighth International Nondestructive Testing of Wood Symposium, Proceedings*, Washington State Univ, and USDA Forest Products Lab., 1991.
5. PÉREZ FAVARO, A.; DE CASTRO, R.; OHTA, S./ Ensayos de propiedades mecánicas de *Pinus taeda* por seis métodos no destructivos, Informe de investigación N° 1, LATU-JICA, 2000.
6. O'NEILL, H./ Propiedades mecánicas de *Pinus taeda*, Métodos destructivos y no destructivos, Expoforesta, Pág. 15 a 24, Paysandú 2000.
7. Grupo Técnico de Madera aserrada de Pino "GT3"/ Propiedades Mecánicas de *Pinus elliottii* Eng. del Litoral de Uruguay, O'NEILL, H.; TARIGO, F.; TRAMBAUER, C., Informe N° 1 Octubre 2002.
8. Grupo Técnico de Madera aserrada de Pino "GT3"/ Propiedades Mecánicas de *Pinus taeda* L. del Litoral de Uruguay, O'NEILL, H., TARIGO, F., TRAMBAUER, C., Informe N° 2 , Junio 2003.
9. MIYATAKE, A.; IMAMURA, Y.; IIMURA, Y.; FUJITA, K./ A Case Study of Inspection for Deterioration of Timber Bridge, High Performance Utilization of Wood for Outdoor Uses. Yuji Imamura 2001.
10. Grupo Técnico de Madera aserrada de Eucalipto "GT2"/ Propiedades Mecánicas de *Eucalyptus grandis* H. del Norte de Uruguay, O'NEILL, H., TARIGO, F., IRAOLA, P. Informe N° 4, Agosto 2004.