

PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE *Pinus taeda* L. DE URUGUAY

Hugo O'Neill²

En el Uruguay existe según la Dirección General Forestal del M.G.A.P una superficie forestada bajo Proyecto del orden de 650.000 hectáreas hasta el año 2003; de esta superficie ocupan aproximadamente un 24 % las plantaciones de *Eucalyptus grandis* H., un 19 % las de *Pinus taeda* L. y un 7 % las de *Pinus elliotii* Eng. 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 y paredes, envases, etc.

Esta presentación pretende difundir los conocimientos existentes en nuestro país sobre las características físicas y mecánicas de las maderas provenientes de plantaciones de *Pinus taeda* L. de nuestro país y ubicar nuestras maderas en el concierto mundial comparando su comportamiento mecánico con el de maderas comerciales de coníferas de otros países.

También pretende mostrar las variaciones de la densidad y del módulo de elasticidad, según el sitio, la edad, la ubicación de la madera en el radio (de la médula a la corteza), la ubicación en la altura y la influencia que tiene la presencia de madera juvenil en esta especie.

Desarrollaremos una clasificación estructural de las vigas ensayadas según norma JAS (Japan Agricultural Standard). Relacionaremos el módulo de rotura de vigas de 2"x 6" con el de pequeñas probetas libres de defectos.

1. Especie, sitios y edades de los rodales muestreados hasta el año 2004

Se realizaron cuatro muestreos de *Pinus taeda* L. uno en el Litoral y tres en Rivera. El primero se realizó a principios del Proyecto JICA – LATU "Tecnología de Ensayos de Productos Forestales" sobre 15 árboles y se estudiaron diferentes propiedades físicas y mecánicas en la troza basal.

Los siguientes tres muestreos se realizaron dentro del grupo de trabajo GT3 "Grupo técnico de madera aserrada" y se estudiaron las propiedades físicas y mecánicas en tres trozas de 4 m hasta una altura de 12 m.

Cuadro N° 1: Especie, sitios y edades de los rodales muestreados

	Edad	Localidad	Cantidad de árboles	Altura del muestreo
<i>Pinus taeda</i> L.	16	Rivera	15	4 m
	24	Río Negro	30	12 m
	24	Rivera	30	12 m
	24	Rivera	5	12 m

Los muestreos fueron selectivos, orientados hacia ejemplares con determinado diámetro, poca conicidad, rectitud de fuste, hábito de ramas y sanidad. No se eligieron aquellos ejemplares que conformaban los bordes de la plantación por considerar que existía en ellos la posibilidad de madera de compresión.

2. Metodología utilizada para la determinación de las propiedades físico mecánicas

Para determinar la densidad aparente básica se obtuvieron tres probetas por rodaja (una rodaja por troza) dispuestas en forma lineal y radial entre la médula y la corteza. A las mismas se las denominó "A" a la probeta

² Per. Agr. - Consultor Departamento de Proyectos Forestales LATU

próxima a la médula, “B” la ubicada en una zona intermedia y la “C” la próxima a la corteza, se sumergieron en agua para conservar su humedad, de forma de poder calcular el volumen por el principio de Arquímedes. Para calcular el volumen mediante este método se pesaron en el plato de la balanza las probetas húmedas y posteriormente se pesaron sumergidas en agua. El volumen es la diferencia entre el peso en el aire de la probeta húmeda y el peso de ésta sumergida.

Las probetas posteriormente fueron secadas en una estufa a 103 ± 2 ° C hasta llegar a estado anhidro (peso anhidro).

Para la determinación de la densidad aparente básica se utilizó la norma ASTM “American Society for Testing and Materials” Standard Test Methods for Specific Gravity of Wood and Wood-Based Materials D 2395, Method B-III.

Se determinó el módulo de elasticidad en trozas con y sin corteza con el equipo FFT Analyzer, método no destructivo basado en el principio de la “Primera Transformada de Furie”,

Luego se aserraron dichas trozas obteniendo tres tablas o vigas de 50 mm x 150 mm x 2800 mm, cada una de estas tres vigas con una ubicación bien definida en el ancho del radio, una con médula o parte de ella incluida denominada “A”, una intermedia entre la médula y la corteza denominada “B” y otra cercana a la corteza denominada “C”.

Las vigas fueron secadas en horno de secado a un contenido de humedad próximo al 12 %. Dichas vigas fueron ensayadas con el FFT Analyzer para obtener el módulo de elasticidad y en ensayo de flexión estática en máquina universal se determinó el módulo de elasticidad y el módulo de rotura.

De las probetas de tamaño real ensayadas se extrajeron pequeñas probetas libres de defectos, en las cuales se realizaron ensayos de flexión estática, flexión dinámica y dureza Janka.

3. Variación del módulo de elasticidad según el sitio

Se compararon los ensayos de dos muestreos de la especie que nos ocupa, uno de Río Negro y el otro Rivera ambos de la misma edad (24 años). Se observó un mayor crecimiento expresado como DAP medio (diámetro a altura de pecho) en el sitio Rivera pero también un menor valor promedio de módulo de elasticidad (MOE), en cuanto a la densidad aparente básica no se observaron diferencias entre los valores 0,384 y 0,391 (g/cm³) de los sitios Río Negro y Rivera respectivamente (ver gráfico N° 1).

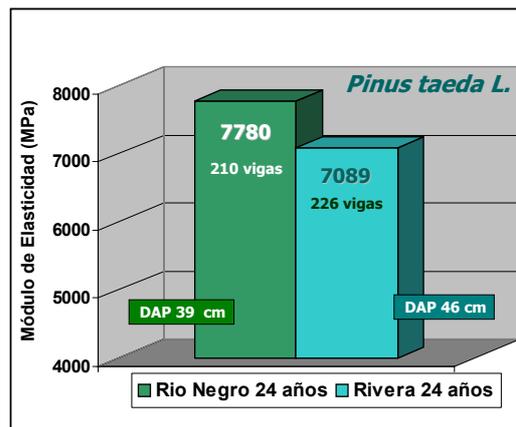


Gráfico N° 1. Variación del MOE según el sitio

4. Variación del módulo de elasticidad entre árboles

Se observó variación del módulo de elasticidad (valor promedio por árbol) entre los árboles. Se muestra a continuación en el gráfico N° 2, la variación que existe entre árboles para dos muestreos del sitio Río Negro de dos especies de pino, *Pinus elliottii* Eng. y *Pinus taeda* L.

Podemos ver que para las dos especies el mayor número de ejemplares se concentra entre las categorías o clases de MOE 7000 y 9000 MPa, siendo el valor promedio del MOE de *P. elliottii* inferior al de *P. taeda* y los valores individuales de los árboles tienden a concentrarse en el caso de *P. taeda* en las categorías mayores de resistencia mecánica o mayor resistencia a la flexión.

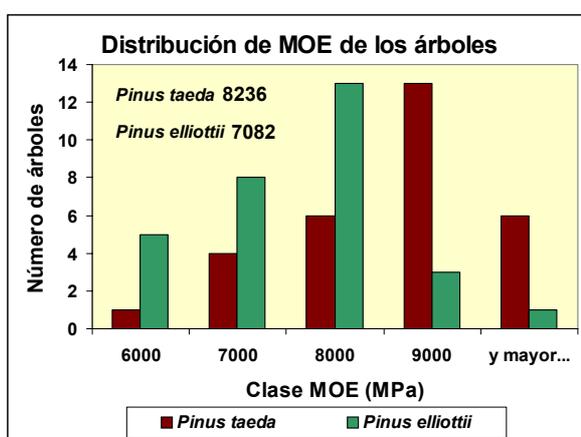
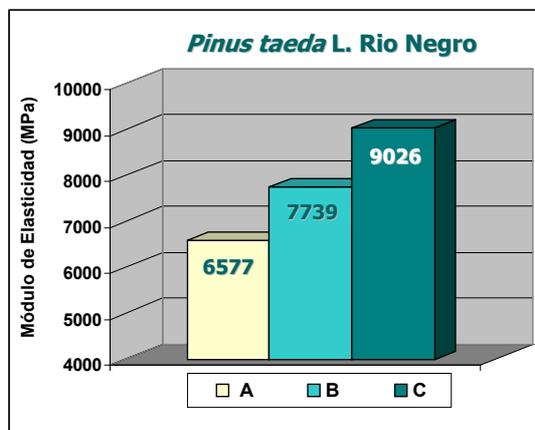
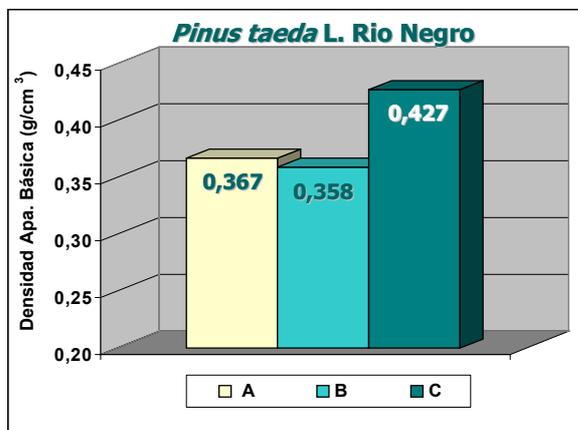


Gráfico N° 2. Variación del MOE entre árboles

5. Variación de la densidad aparente básica y el módulo de elasticidad según la ubicación en el radio

La densidad aparente básica tiende a aumentar a medida que nos acercamos a la corteza, esto es debido principalmente al tipo de madera que se forma próxima a la médula, gran proporción de madera juvenil, madera que tiene características físicas y químicas diferentes a la madera adulta (menos celulosa, más lignina, fibras cortas, etc). En el siguiente gráfico N° 3, vemos que para el sitio Río Negro la densidad aparente básica en la posición del radio "A" tiene un valor promedio levemente superior a la posición "B" (siendo este el más bajo) y es significativamente superior a las posiciones "A" y "B" en la posición "C".

En el módulo de elasticidad la tendencia es similar en cuanto a que aumentan los valores a medida que nos alejamos de la médula, pero la diferencia entre los valores promedio de las distintas ubicaciones es significativa, la tendencia es clara y mantienen una diferencia casi constante entre ellos (ver gráfico N° 4).



Gráficos N° 3 y 4. Variación de la densidad aparente básica y del módulo de elasticidad según la ubicación en el radio.

6. Variación de la densidad aparente básica y el módulo de elasticidad según la ubicación en la altura del fuste

No se observó una significativa variación en los valores promedio de la densidad aparente básica en las tres alturas del fuste estudiadas (de 0 a 4 m, de 4 a 8 m y de 8 a 12 m) ver gráfico N° 5.

No sucede lo mismo con el módulo de elasticidad que sí existen diferencias en los valores promedio para las tres alturas, observándose que en la segunda troza (de 4 a 8 m) los valores promedio son superiores y son menores en la primera troza e intermedios en la tercera troza. Esto coincidiría con la densidad aparente básica que es levemente superior en la segunda troza. (ver gráfico N° 6)

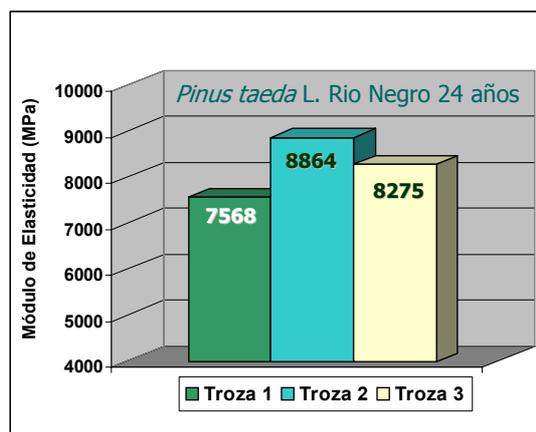
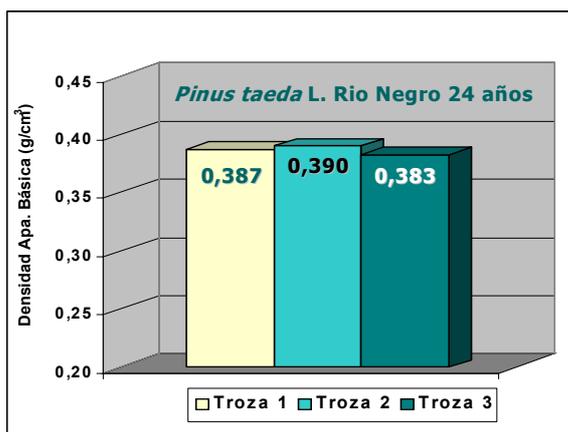


Gráfico N° 5 y 6. Variación de la densidad aparente básica y del módulo de elasticidad según la altura del fuste.

Debemos decir que tanto las tendencias de las variaciones de las propiedades físicas como mecánicas en el ancho del radio como en la altura, han sido similares en todos los muestreos de la especie *Pinus taeda* L. y *Pinus elliottii* Eng. Variando solamente los valores promedio para cada muestreo, dependiendo del sitio y de la especie.

7. Módulo de elasticidad o Resistencia a la flexión

La madera en si es un material muy heterogéneo, podemos decir también que dependiendo de que ubicación del radio y de la altura del árbol ha sido obtenida esta madera, dependerán sus propiedades físicas y mecánicas. En las especies de coníferas implantadas en nuestro país, de corta edad y el rápido crecimiento, estas condiciones hacen que en la madera de estas plantaciones exista una alta proporción de madera juvenil, principalmente en las zonas cercanas a la médula en intermedias entre ésta y la corteza. La presencia de madera juvenil como ya hemos visto (diferentes características físico químicas de la madera) hace que la madera sea más o menos rígida, más o menos resistente a la flexión. Esta propiedad es muy importante en la utilización de la madera para uso estructural (caso del uso como vigas) y en muchos casos la presencia de madera juvenil es limitante para dicho uso. Como veremos mas adelante no toda la madera proveniente de estas plantaciones sería apta para el uso estructural. Pero existen opciones para su utilización, como disminuir la luz entre vigas, distribuyendo de esta forma las cargas y también otra opción es aumentando la sección de dichas vigas. (ver figura N° 1)



Figura N° 1. Resistencia a la flexión

8. Clasificación estructural de las vigas según norma "JAS"

En el siguiente cuadro N° 2 se muestra la clasificación de las vigas o tablas según la norma JAS (Japan Agricultural Standard) para madera de coníferas de uso estructural. Según dicha norma a partir de las categorías E 90 inclusive (MOE igual o superior a 7850 MPa), la madera es apta para la utilización con fines estructurales en la construcción.

Para el caso del *Pinus taeda* L. estudiado y publicados sus resultados en el informe N° 2 del Grupo Técnico de Madera Aserrada (GT3) un 44% de las tablas se ubicaron en la categoría E 90 o mayor y por consiguiente son apta para el uso estructural.

Cuadro N° 4. Porcentaje de tablas según categorías estructurales JAS – *Pinus taeda* L. Río Negro 24 años

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

Si analizamos la totalidad de vigas de todos los muestreos realizados hasta la fecha de *Pinus taeda* L. (575 vigas) y las separamos por ubicación en el radio, veremos en forma clara la influencia de la madera juvenil. En el siguiente gráfico N° 7 se muestra la distribución de las vigas según su resistencia a la flexión, para las vigas A, B y C, con dos límites marcados en los dos ejes, el primer eje marca el límite inferior de 7850 MPa, por el cual todas aquellas vigas que se ubican por debajo de este no son aptas para uso estructural. Tenemos una franja en las que se ubican algunas vigas que sí superan el límite inferior y que son menores a 11770 MPa, estas vigas son aptas estructuralmente y todas aquellas vigas que superan el límite de 11770 MPa además de ser aptas tienen una resistencia superior (tienen un superior desempeño estructural).

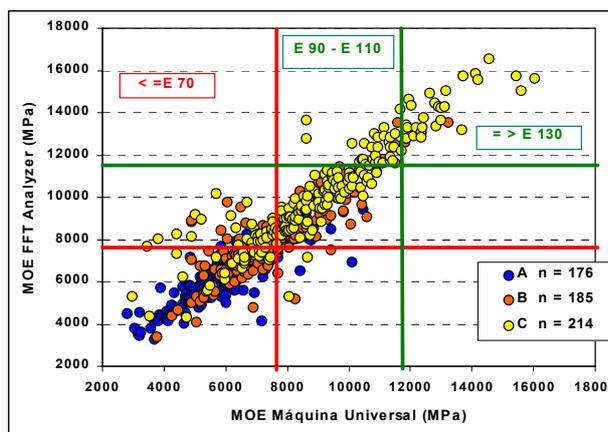


Gráfico N° 7. Distribución estructural de vigas A, B y C

Para el análisis anterior se realizó una gráfica con el MOE obtenido por medio del FFT Analyzer (método no destructivo) en el eje "Y" y el MOE obtenido mediante el ensayo de flexión estática en máquina universal en el eje "X". Debemos mencionar que en general los valores obtenidos por medio de métodos no destructivos son en promedio superiores a los valores promedio del método de referencia en máquina universal.

El siguiente cuadro N° 5 muestra las vigas discriminadas por ubicación en el radio (A, B y C) con su respectiva cantidad y porcentaje de vigas aptas y no aptas para uso estructural. Vemos que a medida que nos alejamos de la médula obtenemos mayor porcentaje de vigas aptas y si analizamos la totalidad de las vigas solo un 40 % de ellas es apta para uso estructural.

Cuadro N° 5. Distribución y aptitud estructural de vigas A, B y C

Vigas A				
Total	No aptas		Aptas	
	Cantidad	(%)	Cantidad	(%)
176	159	90.3	17	9.7
Vigas B				
Total	No aptas		Aptas	
	Cantidad	(%)	Cantidad	(%)
185	124	67.0	61	33.0
Vigas C				
Total	No aptas		Aptas	
	Cantidad	(%)	Cantidad	(%)
214	62	29.0	152	71.0
Vigas A - B - C				
Total	No aptas		Aptas	
	Cantidad	(%)	Cantidad	(%)
575	345	60.0	230	40.0

En el cuadro N° 6 analizamos solamente las vigas B y C, observamos que el porcentaje de aptitud de las vigas aumenta sustancialmente, pasa de un 40% a un 53,4%. Anteriormente hablamos de la influencia de la madera juvenil (cercana a la médula) en las propiedades mecánicas, si descartamos todas aquellas vigas que contengan médula o parte de ella (utilizando esa madera para otros fines) podremos obtener mayores porcentajes de madera apta para el uso estructural.

Cuadro N° 6. Distribución y aptitud estructural de vigas B y C

Vigas B - C				
Total	No aptas		Aptas	
	Cantidad	(%)	Cantidad	(%)
399	186	46.6	213	53.4

9. Relación módulo de rotura de vigas 2"x 6" y de probetas libres de defectos

La influencia de los defectos (nudos, grietas, rajaduras, médula, etc) en el módulo de elasticidad de vigas o tablas de tamaño real (2"x 6") es apreciable, pero la influencia en el módulo de rotura es significativamente mayor. En coníferas como el *Pinus taeda* L. el módulo de elasticidad de vigas de tamaño real puede ser entre un 5 y un 10 % menor que el de las probetas libres de defectos. En cuanto al módulo de rotura esta diferencia es mayor, entre las dos condiciones de ensayo puede ser del orden del 50 % menor en las vigas de tamaño real que en las probetas clear. Si analizamos individualmente cada viga, la diferencia en menos del módulo de rotura dependerá específicamente de la ubicación de los defectos en la sección longitudinal y transversal de la misma (ver gráfico N° 8).

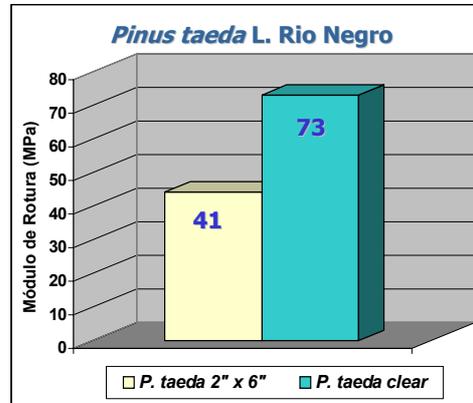


Gráfico N° 8. Relación módulo de rotura de vigas y probetas clear

10. Comparación de la madera de pinos producida en el Uruguay con la madera de coníferas de otros países

Con el fin de ubicar la madera proveniente de nuestras plantaciones de pinos, pareció pertinente compararla con la madera de coníferas producida en otros países. Con la intención también de desmitificar el hecho de que muchas maderas importadas y otras que se comercializan mundialmente son superiores en su calidad (resistencia mecánica) a las maderas uruguayas. En los siguientes cuadros N° 9 y 10 se muestran valores de módulo de elasticidad y módulo de rotura respectivamente, la información que se presenta fue obtenida en el caso de las maderas de coníferas uruguayas de ensayos realizados en el Departamento de Proyectos Forestales del LATU, en probetas libres de defectos (idioma científico internacional de las propiedades mecánicas de la madera), ensayando mas de 1200 probetas. Estos ensayos influyen la totalidad de la madera (juvenil y adulta sí existe). En cuanto a la información presentada de maderas de coníferas extranjeras, la mayoría fue obtenida de publicaciones científicas de varios países (EEUU, N. Zealand, Brasil, Chile, Argentina, etc.) y alguna de información comercial. Tenemos que tener en cuenta para aquellos valores muy altos de MOE caso *Douglas-Fir* (USA) que seguramente son árboles de edades muy superiores a las de nuestras plantaciones. En el caso del *Pinus elliottii* Eng. de 43 años de Uruguay vemos que los valores de MOE son altos y que los de MOR son los más altos. De lo anterior concluimos que al tener turnos de corte más largos obtendremos madera con mayor proporción de madera adulta y por ende de mayor resistencia mecánica.

Comparar nuestras maderas con maderas extranjeras en forma lineal es una tarea difícil, ya que la información de nuestras maderas (coníferas) fue obtenida de cinco muestreos de 15 a 30 árboles por muestreo y de tres alturas hasta 12 m. y la información extranjera no especifica en la mayoría de los casos la cantidad de árboles ensayados, la edad, la altura y si se incluye o no madera juvenil en los resultados.

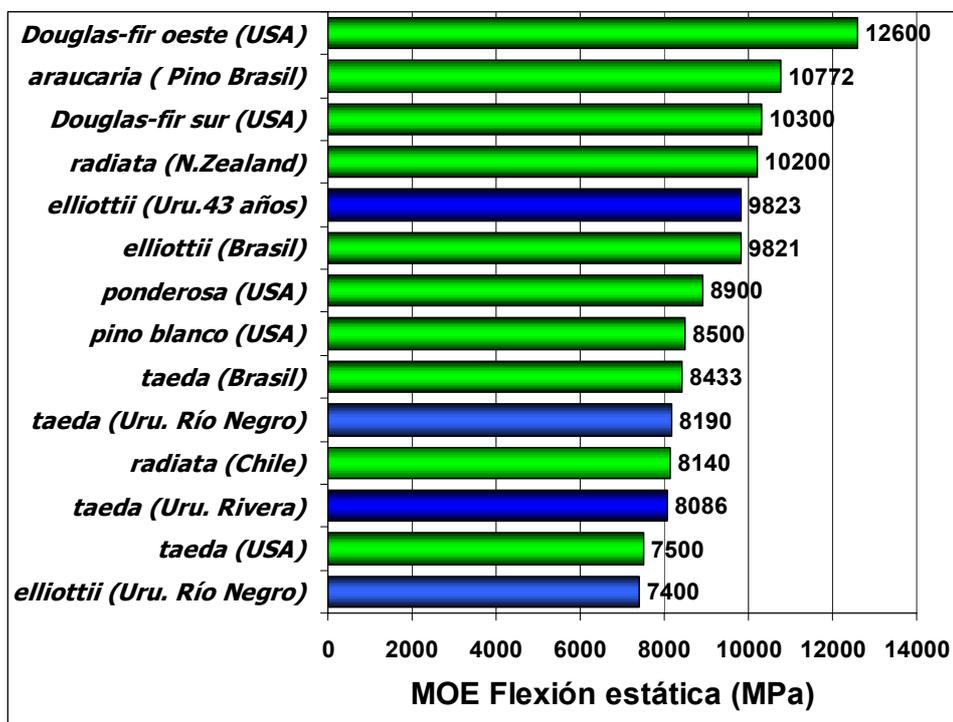


Gráfico N° 9. Comparativo de MOE de coníferas uruguayas y extranjeras

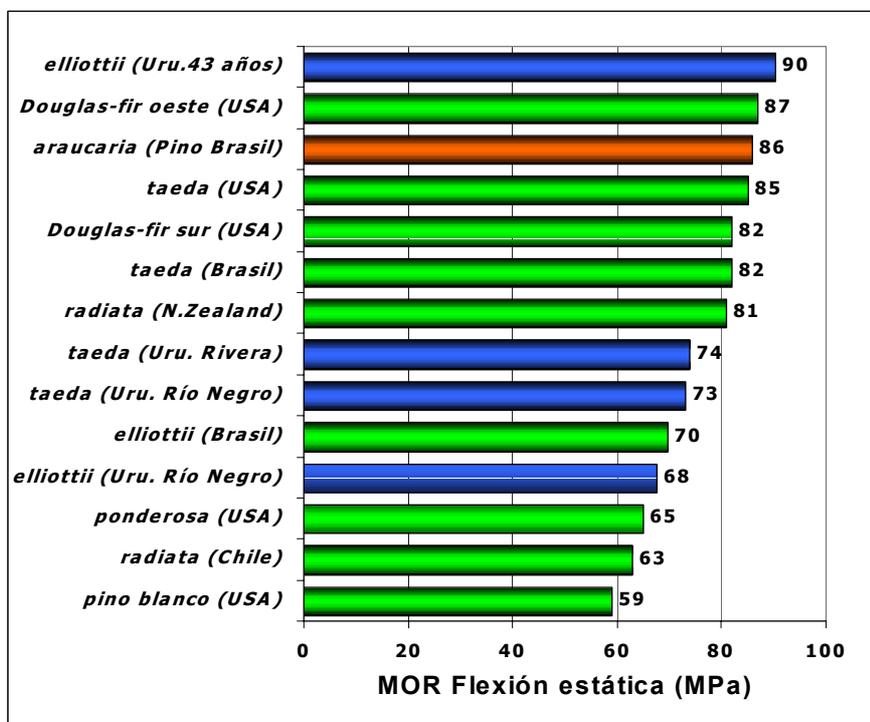


Gráfico N° 10. Comparativo de MOR de coníferas uruguayas y extranjeras

11. Conclusiones

- Las características mecánicas de las maderas producidas en el Uruguay vienen siendo estudiadas desde hace varios años por el Departamento de Proyectos 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.
- Observamos que existen variaciones de la resistencia mecánica entre sitios, según la edad, la ubicación en el radio y en la altura del fuste.
- Debemos tener en cuenta la presencia de madera juvenil, que también tiene una clara influencia en todas las propiedades físicas y mecánicas y en muchos casos la hace no apta para fines estructurales en la construcción.
- Concluimos en que gran parte de la madera producida de plantaciones de *Pinus taeda* L de nuestro país es apta para el uso estructural.

12. 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. Wood Handbook "Wood as an Engineering Material" Forest Products Society, USDA Forest Service, 1999.
5. PÉREZ FAVARO, A.; DE CASTRO, R.; OHTA, S./ Ensayos de propiedades mecánicas de *Pinus taeda* L. por seis métodos no destructivos, Informe de investigación N° 1, LATU-JICA, 2000.
6. O'NEILL, H./ Propiedades mecánicas de *Pinus taeda* L., 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. Grupo Técnico de Madera aserrada de Pino "GT3"/ Propiedades Mecánicas de *Pinus taeda* L. del Norte de Uruguay, O'NEILL, H., TARIGO, F., IRAOLA, P., Informe N° 3 , Junio 2004