

Comportamiento mecánico de la madera de *Pinus taeda* y *Pinus elliottii* proveniente de plantaciones de rápido crecimiento para uso estructural en la construcción en el Uruguay.

Hugo O´Neill, Felipe Tarigo, Andrea Cardoso, Matías Cagno

Introducción

Una vez detectada la necesidad de conocer las características físico mecánicas de las maderas producidas en nuestro país, como herramienta para su uso eficiente en la construcción y en especial para el uso estructural, el Departamento de Proyectos Forestales del Laboratorio Tecnológico del Uruguay desde mediados de la década del noventa, comenzó a trabajar en la caracterización físico mecánica de las maderas provenientes de plantaciones de rápido crecimiento. Con énfasis en aquellas especies cuyo probable destino final fuese la madera sólida aserrada y productos de ingeniería de la madera. Se comenzó dicha caracterización mediante pequeñas probetas libres de defectos (clear) en ensayos de flexión estática, flexión dinámica, tracción y compresión paralela y perpendicular a las fibras, etc. A fines del año 1998 la incorporación en nuestro laboratorio de una máquina universal de ensayos con capacidad de ensayar ejemplares de mayor tamaño, nos permitió comenzar a caracterizar vigas de tamaño estructural. Paralelamente también se continuó ensayando pequeñas probetas libres de defectos, extraídas de las vigas ensayadas, con el objetivo de obtener valores de referencia de los módulos de elasticidad y resistencia a la flexión y poder de esa forma evaluar la influencia de los defectos presentes en las vigas de tamaño real.

Se realizaron once muestreos de pinos, cuatro de *Pinus elliottii* de edades de 24 a 43 años y siete de *Pinus taeda* de edades de 12 a 24 años. Los muestreos de caracterización realizados, se enmarcaron dentro del Proyecto de Cooperación Técnica JICA – LATU (Pro) (1998-2003), dentro de los Grupos Técnicos de Madera Aserrada de pino y eucaliptos (GT), este último integrado por la Dirección General Forestal MGAP, la Sociedad de Productores Forestales, la Asociación de Industriales de la Madera, la Facultad de Agronomía UDELAR e INIA, con la coordinación y ejecución por parte del Departamento de Proyectos Forestales del LATU (2000-2008), también dentro del proyecto de "Caracterización Tecnológica de las Principales Especies Forestales Cultivadas en el Uruguay" (Dirección General Forestal de MGAP, Facultad de Agronomía y Facultad de Arquitectura UDELAR y LATU) (1995 a 1998) y dentro del proyecto del Programa de Desarrollo Tecnológico (PDT) del Ministerio de Educación y Cultura "Evaluación no destructiva de la calidad de trozas de raleos de árboles de pequeño diámetro y su utilización en productos de ingeniería de la madera de valor agregado" (2005-2007).

Como resultado de esta caracterización se presentará en esta publicación los valores medios de módulo de elasticidad global en flexión (MOEg), el módulo de rotura o resistencia a la flexión (MOR), la densidad aparente corriente (DAC), con sus respectivos valores de resistencia y densidad característica expresados mediante el quinto percentil (UNE EN 384), la asimetría (**As**) (Skewness) y el Coeficiente de Curtosis (**Ct**) (Kurtosis). Como también su categorización o clasificación mediante la norma UNE EN 338 : 2010 Madera estructural, Clases resistentes.

En el futuro próximo los resultados de este estudio sumados a los que se obtendrán de dos proyectos en curso servirán como base para la normalización de nuestras maderas de pinos para uso estructural (norma de clasificación visual de madera para uso estructural, norma de cálculo estructural de madera). Dichos proyectos son "Caracterización estructural de madera aserrada de pinos (*Pinus elliottii* y *Pinus taeda*) asociada a grados estructurales" iniciado en marzo de 2011, gestionado y ejecutado por la universidad ORT y el LATU, financiado por la Agencia Nacional de Investigación e Innovación ANII y co financiado por LATU y ORT, sobre dos muestreos de madera comercial de pino del litoral oeste y el sur oeste de nuestro país. Y el proyecto "Segunda etapa de Caracterización estructural de madera aserrada de pinos (*Pinus elliottii* y *Pinus taeda*) asociada a grados estructurales" que es financiado por el fondo de industria de la Dirección Nacional de Industrias, del Ministerio de Industria y Energía y Minería y co financiado por el LATU, también con dos muestreos pero del centro - norte de nuestro país.

Materiales y métodos

Muestreos

Todos los muestreos fueron dirigidos buscando los ejemplares medios de cada rodal, teniendo en cuenta en diámetro a la altura del pecho (DAP), las características del fuste (rectitud, conicidad, longitud, ramificaciones, etc), la sanidad, el manejo, también se evitó árboles en los cuales se pudiese presumir alguna característica diferente en la madera o no normal (madera de compresión en árboles de borde, de terrenos muy inclinados, de copas irregulares, etc).

En cada muestreo se seleccionaron de veinte a treinta árboles, se aparearon y se trozaron en dos o tres trozas de 3 a 4 metros de longitud, evaluando de esta forma las propiedades en la altura del fuste hasta doce metros. La casi totalidad de las trozas fueron evaluadas por métodos no destructivos, para estimar el módulo de elasticidad dinámico. Luego fueron aserradas obteniendo al menos tres vigas de 2" x 6"x 2800 o 3300 mm, de tres posiciones en el radio de cada troza, una de la zona cercana a la corteza (madera lateral denominada C), otra de la zona entre la corteza y la médula (intermedia denominada B) y una en el caso de las coníferas muy cercana o incluyendo la médula (denominada A), de esta forma se estudio también la variación de las propiedades en el radio. Dichas vigas antes de ser ensayadas, fueron secadas en horno de secado industrial o de escala piloto hasta aproximadamente un 12 % de contenido de humedad.

Materiales muestreados de los cuales se obtuvieron las vigas de 2" x 6"

Tabla N°1: Muestreos realizados en las especies de *Pinus taeda* y *Pinus elliottii*

<i>Pinus elliottii</i> (103 árboles, 183 trozas y 618 vigas)	San José , febrero 2001, edad 43 años, 18 árboles, 18 trozas básicas (Pro)
	Río Negro , agosto 2001, edad 24 años, 30 árboles, 30 trozas básicas (Pro)
	Río Negro , agosto 2001, edad 24 años, 30 árboles, 60 trozas, 30 segundas y 30 terceras (GT)
	Rivera , julio 2003, edad 24 años, 25 árboles, 75 trozas (GT)
<i>Pinus taeda</i> (145 árboles, 275 trozas y 818 vigas)	Rivera , setiembre 1999, edad 17 años, 15 árboles, 15 trozas básicas (Pro)
	Río Negro , setiembre 2001, edad 24 años, 30 árboles, 30 trozas básicas (Pro)
	Río Negro , setiembre 2001, edad 24 años, 30 árboles, 60 trozas, 30 segundas y 30 terceras (GT)
	Rivera , mayo 2002, edad 24 años, 25 árboles, 75 trozas (GT)
	Rivera , julio 2003, edad 24 años, 5 árboles, 15 trozas (GT)
	Paysandú , abril 2006, edad 12 años, 20 árboles, 40 trozas, 20 primeras y 2 segundas (PDT)
Tacuarembó , setiembre 2006, edad 12 años, 20 árboles, 40 trozas, 20 primeras y 2 segundas (PDT)	

Determinación del módulo de elasticidad, resistencia a la flexión o módulo de rotura y densidad aparente corriente.

Se determinó el módulo de elasticidad global en vigas de 2" x 6", mediante el ensayo de flexión estática con geometría de cuatro puntos, en máquina universal de ensayos marca Minebea, con una celda de carga de 250 kN. Se utilizó la norma ASTM D 198 Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes, se ensayo en todos los casos vigas a un contenido de humedad muy próximo al 12 %. Llegando a la rotura se determinó también la resistencia a la flexión o el módulo de rotura. En la mayoría de los muestreos realizados se ensayaron también pequeñas probetas libres de defectos provenientes de las vigas evaluadas, este ensayo se realizó en máquina universal de ensayos marca Minebea, modelo NB 50 con una celda de carga de 50 kN. Los resultados de los ensayos en pequeñas probetas serán informados en futuras publicaciones.

Se determinó también para cada una de las vigas el contenido de humedad y la densidad aparente corriente. Para estas determinaciones se utilizaron las Normas ASTM D 4442 Standard Test Methods for Direct Moisture Content Measurement of Wood and Wood Base Materials y ASTM D 2395 Standard Test Methods for Specific Gravity of Wood and Wood Materials.

Estimación del módulo de elasticidad no destructivo

Se estimó el módulo elástico en la mayoría de las vigas de los muestreos, mediante métodos no destructivos (MOE dinámico), utilizando el FFT Analyzer (vibración longitudinal) y el equipo Fakopp (velocidad de propagación del sonido). Para esta publicación se mostrarán resultados del FFT Analyzer por ser los que presentaron mejor correlación con el método de referencia, el ensayo de flexión estática en máquina universal. Los valores de los otros métodos no destructivos fueron informados en las diferentes publicaciones de cada uno de los muestreos (Grupos técnicos - LATU)

Interpretación de resultados

Se presentan los valores medios de módulo de elasticidad global (MOEg), el módulo de rotura o resistencia a la flexión (MOR), la densidad aparente corriente (DAC), con sus respectivos valores de resistencia característica, expresados mediante el quinto percentil (UNE EN 384:2010). Esta última es una medida de posición con la cual podemos asegurar que el 95 % de los valores de la población son superiores a ese valor característico. Se presentan también para cada uno de los muestreos medidas de simetría y de la dispersión de la distribución como el coeficiente de asimetría (**As**) (Skewness) y el coeficiente de curtosis (**Cr**) (Kurtosis). Se realizó una categorización de acuerdo a su resistencia según la norma UNE-EN 338:2010 Madera estructural. Clases resistentes. (Ver tabla N°2)

Tabla N°2: Clases resistentes. Valores Característicos (Fragmento Tabla 1 norma UNE EN 338:2010)

Propiedades de resistencia	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30
MOR 5to percentil (MPa)	14	16	18	20	22	24	27	30
MOE medio (MPa)	7000	8000	9000	9500	10000	11000	11500	12000
MOE 5to percentil (MPa)	4700	5400	6000	6400	6700	7400	7700	8000
Densidad Ap. Corriente media (g/cm ³)	0,350	0,370	0,380	0,390	0,410	0,420	450	460
Densidad Ap. Corriente 5to percentil (g/cm³)	0,290	0,310	0,320	0,330	0,340	0,350	370	380

Se realizaron análisis de varianza y pruebas de comparación múltiple de Tukey (con un nivel de significación del 5%) para algunos grupos de valores o datos, según la edad de los árboles, según la altura en el fuste (1, 2, 3) y según la posición en el radio (A, B, C).

Resultados y discusión:

Pinos estudiados: *Pinus taeda* y *Pinus elliottii*

Se muestran a continuación los valores obtenidos de las vigas de 2"x 6" en los ensayos de estimación de módulo de elasticidad (MOE) mediante el FFT Analyzer (método no destructivo), del módulo de elasticidad global (MOEg) y el módulo de rotura (MOR) determinados mediante ensayo de flexión estática en máquina universal, como también la densidad aparente corriente:

Tabla N° 3: Valores obtenidos de 1436 vigas de 2" x 6" de las especies *Pinus taeda* y *Pinus elliottii* analizadas juntas.

Propiedad	MOE FFT Analyzer (MPa)	MOE Máq. Universal (MPa)	MOR Máq. Universal (MPa)	Densidad Ap. Corriente (g/cm ³)
Número de vigas	1436	1426	1429	1418
Media	7582	7085	35,5	0,443
Máximo	16569	16020	90,1	0,672
Mínimo	3159	2217	5,3	0,324
STD	2399	2300	18,0	0,056
CV (%)	31,6	32,5	50,6	12,8

Tabla N° 4: Valores de 5to. Percentil, Asimetría y Curtosis obtenidos de 1436 vigas de 2" x 6" de las especies de *Pinus taeda* y *Pinus elliottii* analizadas en conjunto.

Propiedad	MOE FFT Analyzer (MPa)	MOE Máq. Universal (MPa)	MOR Máq. Universal (MPa)	Densidad Apa. Corriente (g/cm ³)
5to. percentil	4477	3938	12,9	0,356
Asimetría (Skewness)	0,85	0,77	0,70	0,45
Curtosis (Kurtosis)	0,42	0,39	-0,24	0,12

Tabla N° 5: Valores medios y resistencia característica de los ensayos realizados en 618 vigas de 2" x 6" de *Pinus elliottii*

Propiedad / Sitio	Río Negro 24 años (GT)	Rivera 24 años (GT)	Río Negro 24 años (Pro)	San José 43 años (Pro)
Número de vigas	194	249	96	79
MOR 5to percentil (MPa)	14,4	13,2	19,2	28,0
MOE medio Máq. Universal (MPa)	6499	6959	8261	9172
MOE 5to percentil (MPa)	4701	4087	5088	6322
Densidad Ap. Corriente media (g/cm ³)	0,404	0,411	0,477	0,486
Densidad Ap. Corriente 5to percentil (g/cm³)	0,343	0,347	0,412	0,429
Clase Resistente (EN 338:2010)	< C14	< C14	C14	C18

A modo de ejemplo: En el caso del muestreo de Río Negro de 24 años (GT) no pudo clasificarse en la clase C14 por tener un módulo de elasticidad medio menor a 7000 MPa. El muestreo de Rivera 24 años si bien tiene valores de densidad apropiados para calificar como C14, tanto el MOR característico como el MOE medio están por debajo de los valores requeridos. El muestreo de Río Negro 24 años (Pro) si bien tiene un valor característico de MOR de 19 MPa y un MOE medio de 8261 MPa que lo clasificaría en C16 y la densidad aparente corriente que lo clasificaría en C30, clasifica en C14 por tener un valor medio de MOE menor 5400 MPa. Algo similar ocurre con el muestreo de San José de 43 años que clasifica en C18.

Tabla N° 6: Valores medios y resistencia característica de los ensayos realizados en 818 vigas de 2" x 6" de *Pinus taeda*

Propiedad / Sitio	Río Negro 24 años (GT)	Río Negro 24 años (Pro)	Rivera 24 años (GT)	Rivera 17 años (Pro)	Paysandú 12 años (PDT)	Tacuarembó 12 años (PDT)
Número de vigas	212	92	225	50	119	120
MOR 5to percentil (MPa)	14,6	21,0	13,5	22,3	10,9	8,7
MOE medio Máq. Universal (MPa)	7769	9310	7084	6370	5017	5397
MOE 5to percentil (MPa)	5294	5091	4099	3274	3514	3390
Densidad Apa. Corriente media (g/cm ³)	0,456	0,511	0,472	0,479	0,388	0,416
Densidad Apa. Corriente 5to percentil (g/cm ³)	0,405	0,440	0,413	0,414	0,334	0,374
Clase Resistente (EN 338:2010)	C14	C14	<C14	<C14	<C14	<C14

De los muestreos que no califican (<C14) se destaca el de Rivera 24 años con un valor de MOR característico apenas 0,5 MPa menor al mínimo exigido teniendo un valor de MOE medio dentro de los requerimientos para la clase C14. En el caso de Rivera 17 años si bien tiene un MOR característico que lo podría situar en C22, el MOE medio y característico lo descalifican.

Análisis de las propiedades en la altura del fuste y en el radio

Se realizó el análisis de las dos especies *P. elliotii* y *P. taeda* y de todos los muestreos en conjunto. La importancia de este análisis radica en la toma de decisiones al momento de procesar la madera, según su destino final ya sea madera para uso estructural en la construcción o para otros usos de menor exigencia mecánica.

Tabla N° 7: Valores medios y resistencia característica de la vigas ensayadas según la troza (1ra. basal, 2da. de 4 a 8 m y 3ra. De 8 a 12 m) de donde fue obtenidas.

Propiedad / N° troza	1	2	3
Número de vigas	673	446	309
MOR 5to percentil (MPa)	18,4	11,3	11,5
MOE medio Máq. Universal (MPa)	7539	6778	6542
MOE 5to percentil (MPa)	3800	4040	4105
Densidad Ap. Corriente media (g/cm ³)	0,467	0,418	0,423
Densidad Ap. Corriente 5to percentil (g/cm ³)	0,385	0,334	0,350
Clase Resistente (EN 338:2010)	<C14	<C14	<C14

Si bien el valor de MOR característico supera lo establecido para C14 y C16, las vigas de la troza 1 (basal) no clasifican en la clase C14 por tener un valor característico de MOE menor a 4700 MPa.

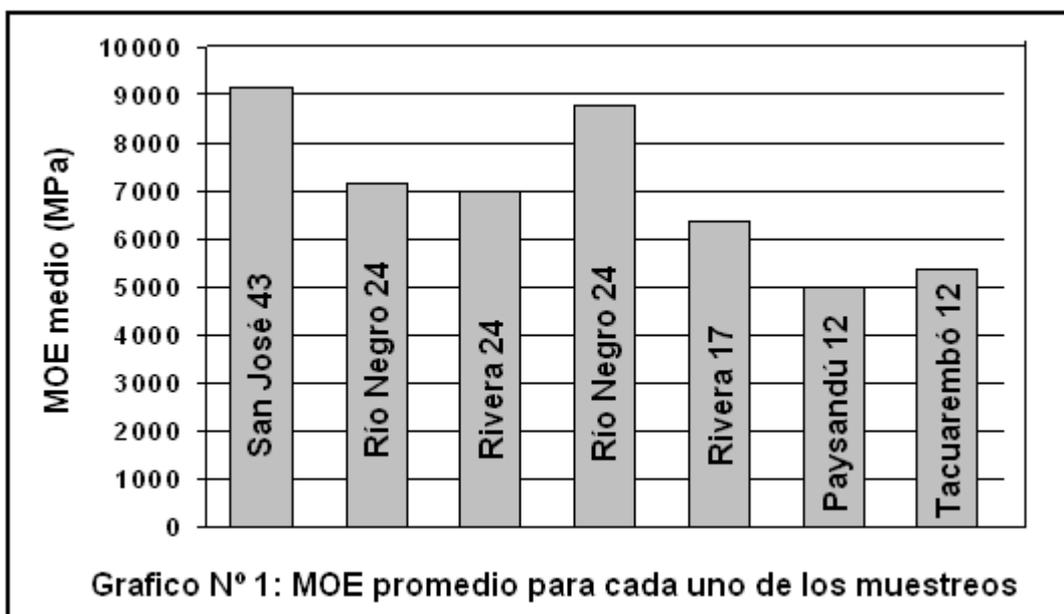
Tabla N° 8: Valores medios y resistencia característica de las vigas ensayadas según la posición en el radio de donde fue obtenida.

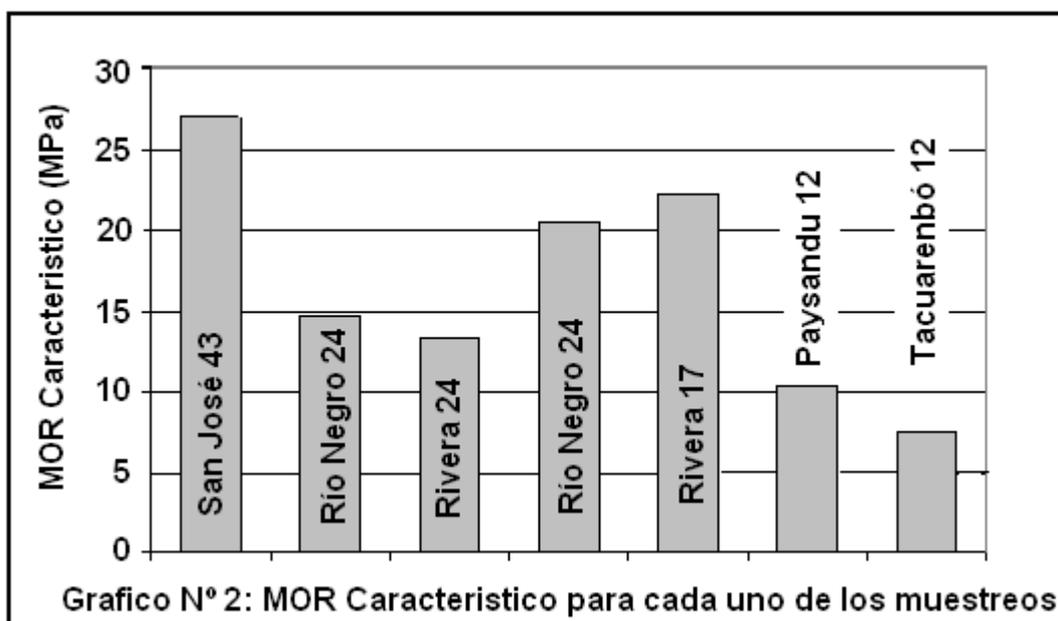
Propiedad / Posición en radio	A	B	C
Número de vigas	434	475	520
MOR medio Máq. Universal (MPa)	25,4	33,7	45,7
MOR 5to percentil (MPa)	11,9	13,0	15,0
MOE medio Máq. Universal (MPa)	5614	6940	8444
MOE 5to percentil (MPa)	3625	4044	4722
Densidad Apa. Corriente media (g/cm ³)	0,408	0,474	0,441
Densidad Apa. Corriente 5to percentil (g/cm ³)	0,344	0,407	0,361
Clase Resistente (EN 338:2010)	<C14	<C14	C14

Al igual que en la tabla anterior (Tabla N° 8) en ésta se puede observar la influencia de la madera juvenil, ya que las vigas que clasificaron en C14 son las provenientes de la posición "C" (madera lateral) con mayor proporción de madera adulta.

Análisis de las propiedades en función de la edad para las diferentes alturas en el fuste y posiciones en el radio.

En base a la categorización que resultó de los diferentes muestreos, se observó que es importante realizar una discriminación por edad de corte y posición en el árbol, con el objetivo de poder identificar dentro de cada troza aquella madera que pueda calificar para el uso estructural.





Como se muestra en las tablas 5 y 6 y en los gráficos 1 y 2, los muestreos provenientes de árboles de edades de 24 a 43 años presentaron valores de las propiedades en estudio dentro de los requerimientos de la categorización. Para el análisis que sigue a continuación se formaron dos grupos según la edad, muestreos de plantaciones de menos de 20 años (Paysandú 12 años, Tacuarembó 12 años y Rivera 17 años) y los provenientes de más de 20 años (Río Negro 24 años GT y Pro, Rivera 24 y San José 43 años), se analizaron los valores de las vigas según la altura en el árbol y la posición en el radio.

Tabla N° 9: Valores medios y característicos de las vigas provenientes de las plantaciones menores a 20 años según la troza y posición en el radio.

Troza	1			2		
	A	B	C	A	B	C
Número de vigas	52	53	59	44	36	40
MOR 5to percentil (MPa)	12,1	12,9	18,8	7,2	6,6	8,8
MOE medio Máq. Universal (MPa)	5065	5356	6078	4813	5195	5692
MOE 5to percentil (MPa)	3144	3451	3772	3380	3382	4013
Densidad Ap. Corriente media (g/cm ³)	0,426	0,440	0,444	0,379	0,380	0,396
Densidad Ap. Corriente 5to percentil (g/cm ³)	0,369	0,390	0,389	0,327	0,333	0,358
Clase resistente (EN 338:2010)	<C14	<C14	<C14	<C14	<C14	<C14

Se observó en todos los casos que las vigas provenientes de plantaciones menores a 20 años no alcanzan los requisitos mínimos de clasificación en clases estructurales (UNE EN 338). En general los valores de MOR característico no superan el mínimo de 14 MPa y en el caso de la troza 1 en la posición C no supera el valor mínimo de MOE medio.

Se realizó una Tukey (5%) para la variable MOE y MOR, para conocer si existen diferencias entre las diferentes posiciones en el radio de las vigas provenientes de la troza 1 de árboles menores a 20 años. Se encontró que existen diferencias significativas entre las vigas provenientes de la posición A y C, por lo que en árboles de éstas características no se obtiene una resistencia diferencial obteniendo y clasificando vigas en posiciones intermedias.

Mediante el mismo análisis estadístico se obtuvo para las vigas provenientes de la troza 2 de los árboles de menos de 20 años, que no existen diferencias significativas entre los valores de MOR para las diferentes posiciones en el radio y para los valores de MOE solo existen diferencias entre las posiciones A y C.

Tabla Nº 10: Valores medios y característicos de las vigas provenientes de las plantaciones mayores a 20 años según la troza y posición en el radio.

Troza	1			2			3		
Propiedad / Posición	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Número de vigas	126	165	165	105	112	109	106	109	95
MOR 5to percentil (MPa)	18,0	20,6	39,3	13,1	13,8	17,6	10,6	13,0	12,9
MOE medio Máq. Universal (MPa)	5702	7782	10168	5837	7338	8817	5886	6601	7199
MOE 5to percentil (MPa)	3603	5157	6611	4189	5294	6259	3931	4100	4549
Densidad Ap. Corriente media (g/cm ³)	0,577	0,461	0,510	0,419	0,420	0,454	0,419	0,416	0,437
Densidad Ap. Corriente 5to percentil (g/cm ³)	0,380	0,380	0,437	0,348	0,342	0,376	0,354	0,348	0,437
Clase Resistente (EN 338:2010)	<C14	C14	C20	<C14	<C14	C16	<C14	<C14	<C14

Se observó que las vigas de la troza 1 todas alcanzan los valores mínimos de MOR característico, aún así las provenientes de la posición A no llegan a clasificar por no alcanzar el mínimo requerido de MOE medio para la clase C14. En el caso de las vigas provenientes de la troza 2 y de las posiciones A y B no llegan a clasificar por tener valores de MOE característico inferiores al mínimo requerido de 14 MPa.

Conclusiones y comentarios:

En la actualidad en nuestro país, la mayoría de los árboles de pino con destino al aserrado se cosechan a corta edad (árboles de raleo), hecho que sumado a los rápidos crecimientos que presentan las especies como *Pinus taeda* y *Pinus elliotti*, hacen que la madera no cumpla con los requisitos mínimos necesarios para el uso estructural. La madera de pino con estas características tiene importante participación en productos derivados como contrachapados, SWP (*Solid Wood Panel*), LVL (*Laminated Veneer Lumber*), OSB (*Oriented Strand Board*), OSL (*Oriented Strand Lumber*), PSL (*Parallel Strand Lumber*), LSL (*Laminated Strand Lumber*), MDF (*Medium Density Fiberboard*). etc.

Teniendo en cuenta las diferentes edades y ubicaciones de las vigas dentro de la troza se observa que la influencia de una alta proporción de madera juvenil condiciona la resistencia, por tanto su aptitud para el uso estructural. Es importante decir que la madera lateral procedente de las cercanías de la corteza si podría calificar en una importante proporción como madera estructural, se pudo observar que el módulo de elasticidad fue el factor limitante en la gran mayoría de los casos.

Como se ha concluido en notas anteriores, también en estos análisis queda evidenciado que es necesario distinguir la parte del árbol de donde se obtienen las vigas, ya sea en altura o en el radio. Las vigas provenientes de la troza basal y segunda, de árboles de más de 20 años y con mayores proporciones de madera adulta (posición C) calificaron como aptas para uso estructural, en clases que fueron de C14, C16 y hasta C20 según la norma UNE-EN 308:2010.

Recientemente a partir del proyecto de "Caracterización estructural de madera aserrada de *Pinus taeda* y *Pinus elliottii* asociada a grados estructurales" ANII - Fondo Maria Viñas, Facultad ORT y el Departamento de Proyectos Forestales del LATU, se llegó a resultados de valores de resistencia de la madera que son similares a los que se obtuvieron en los trabajos de caracterización mencionados en ésta nota técnica.

Es importante decir también que la clasificación de la madera, ya sea de forma mecánica (flexión, ultra sonido, vibración longitudinal o transversal, etc.) o de forma visual (nudos, alabeos, etc) contribuirá y permitirá la creación de una cultura en la utilización de la madera, de un mercado de madera estructural y por consiguiente su uso eficiente en la construcción.

Como producto de los proyectos de Caracterización estructural (visual) con fondos de ANII y del Fondo de Industrias de la DNI, se elaborará un manual de clasificación visual de pinos para uso estructural y toda la información recabada hasta la fecha por el Departamento de Proyectos Forestales del LATU se utilizará como base para la norma nacional de cálculo estructural.