

Proyecto para la caracterización estructural de madera aserrada de pinos cultivados en Uruguay

Laura Moya

*Facultad de Arquitectura
Universidad ORT Uruguay*

Andrea Cardoso

*Departamento de Proyectos Forestales
Laboratorio Tecnológico del Uruguay*

Matías Cagno

*Departamento de Proyectos Forestales
Laboratorio Tecnológico del Uruguay*

Ma. Fernanda Laguarda

*Facultad de Arquitectura.
Universidad ORT Uruguay*

Francisco Gatto

*Departamento de Proyectos Forestales
Laboratorio Tecnológico del Uruguay*

Hugo O'Neill

*Departamento de Proyectos Forestales
Laboratorio Tecnológico del Uruguay*

Resumen Ejecutivo

La madera aserrada para aplicaciones estructurales debe ser previamente clasificada de acuerdo a su resistencia mecánica y rigidez. La clasificación estructural permite asignarle a cada categoría una familia de tensiones que posibilita diseñar, calcular y construir edificaciones de madera en forma confiable y eficiente. En el país no se cuenta con madera aserrada clasificada así como tampoco con normas que establezcan criterios de clasificación y asignación a grados o clases resistentes.

Con el propósito de caracterizar la madera aserrada de pinos que se cultiva en el país desde el punto de vista de las propiedades requeridas para uso estructural, la Facultad de Arquitectura de la Universidad ORT Uruguay y el Departamento de Proyectos Forestales del LATU, desarrollaron el proyecto "Caracterización estructural de madera aserrada de pinos (*P. elliotii* y *P. taeda*) asociada a grados estructurales".

El proceso de caracterización se focalizó en las propiedades físicas y mecánicas de mayor relevancia: módulo de elasticidad y resistencia en flexión, densidad, resistencias de compresión paralela y de tracción paralela a la fibra. Se utilizó como procedimiento el ensayo a la rotura de aproximadamente 900 piezas de tamaño comercial, que permitieron determinar las propiedades mecánicas indispensables para implementar criterios de diseño estructural. Previamente a la realización de los ensayos, las piezas fueron clasificadas en tres grados de calidad, basados en la metodología de clasificación de madera aserrada estructural chilena. Basado en los límites establecidos en las normas europeas y chilenas, la madera fue asignada a la clase estructural C14 y al grado G2 respectivamente.

Palabras clave: Grados estructurales, madera estructural, pinos de Uruguay

1. INTRODUCCIÓN

Clasificación por resistencia de madera y el sistema de clases resistentes

La madera para ser usada con fines estructurales en arquitectura y construcción debe ser previamente clasificada a partir de una resistencia y rigidez estimada. A menudo y en ámbitos no profesionales, se suele confundir "clasificación por resistencia" con "clasificación por apariencia": mientras que en el primer caso se controla en una pieza la presencia, tamaño, ubicación y frecuencia de características de crecimiento que inducen a disminuir sus propiedades mecánicas, en el segundo, el control se realiza sobre la mejor cara de una pieza considerando la presencia de atributos de crecimiento que desmejoran el aspecto general de la cara (Wagner 1994).

El objetivo de la clasificación por resistencia es asegurar que una determinada pieza de madera que será utilizada como componente estructural tenga la capacidad para resistir la carga de diseño. La clasificación por resistencia puede ser realizada mediante dos técnicas, que en forma combinada permiten definir resistencias y rigidez con precisión: i) visual, en la cual la superficie de cada pieza es examinada por técnicos entrenados que estiman la influencia de características naturales sobre la resistencia y rigidez de la pieza; ii) mecánica, mediante mediciones no destructivas de varias propiedades, realizadas en máquinas. Si bien la clasificación visual es la técnica más usada para decidir sobre la calidad estructural de la madera, el empleo de técnicas de clasificación mecánica automatizada se ha incrementado en los últimos años (Fernández-Golfín et al. 2001). A partir del tipo de clasificación adoptada se establecen "grados visuales" o "grados mecánicos". Estas dos técnicas de clasificación producen diferencias en la asignación de propiedades y en los procedimientos de clasificación, cuando se consideran además distintas especies. A efectos de compatibilizar ambos procedimientos, han surgido los "sistemas de clases resistentes". Un sistema de clases resistentes es un sistema de clasificación por grado, que presenta un conjunto ordenado de parámetros de diseño.

En Europa, la clasificación estructural de madera se realiza de acuerdo a un conjunto de tres normas consecutivas del Comité Europeo de Normalisation (CEN), aplicadas en el siguiente orden (Steiger & Arnold 2009):

- i) En primer término, se realizan ensayos para determinar las propiedades mecánicas, contenido de humedad (CH) y densidad, de cuerpos de prueba de tamaño estructural de acuerdo a la norma EN 408-2003.
- ii) A continuación, valores característicos de propiedades mecánicas y de densidad son derivados de los resultados de ensayos de acuerdo a la norma EN 384-2004. La norma provee reglas de selección de material, análisis y ajuste de valores de ensayo de acuerdo a geometrías o condiciones climáticas diferentes a las de referencia, publicadas en EN 408-2003.
- iii) Finalmente, la madera es clasificada de acuerdo a EN 338-2003. Para las maderas de coníferas la norma define doce clases resistentes, denominadas con el prefijo "C", y un número que representa el valor característico de la resistencia para cada clase resistente. Por ejemplo, una pieza clasificada "C14" tiene una resistencia característica de flexión de 14 MPa. Una población específica puede ser asignada a cierta clase resistente si el valor característico de

su densidad y de su resistencia de flexión (ambos son 5tos. percentiles), así como el módulo de elasticidad (valor medio, usualmente derivado del ensayo de flexión), es igual o mayor que los valores de la clase deseada. Otras propiedades mecánicas necesarias para el diseño de estructuras de madera son derivadas a partir de estos valores básicos mediante relaciones empíricas.

En Chile, la experiencia es similar a la descrita anteriormente:

- i) Existe un conjunto de normas del Instituto Nacional de Normalización (INN) para caracterizar las maderas, que diferencia normas para cuerpos de prueba libres de defectos y de tamaño pequeño, de las normas para cuerpos de prueba de tamaño estructural. Dentro de este último grupo la NCh 3028/1-2006 y la NCh 3028/2-2006 establecen procedimientos de ensayos para determinar las propiedades físicas y mecánicas, y procedimientos de muestreo y evaluación de los valores característicos para cuerpos de prueba de tamaño estructural.
- ii) La clasificación y asignación a grados estructurales, se realiza en base a procedimientos y normas para madera aserrada de todas las especies excepto la de pino radiata (*Pinus radiata*) por un lado, y la norma de clasificación visual NCh 1207-2005 para pino radiata y su respectiva metodología de asignación a grados estructurales, por el otro.
- iii) Esta división entre las propiedades de la madera aserrada de "todas las especies excepto el pino radiata", y la del "pino radiata", también se acusa en la NCh 1198-2006. En esta norma se establece por un lado, las clases estructurales para el primer grupo de especies, y los grados estructurales para el pino radiata, discriminándose además en este último, cuatro grados visuales, GS, G1, G1 y mejor, y G2, y dos grados mecánicos C24 y C16.

Contexto nacional y objetivos

El sector forestal ha tenido un incremento significativo en los últimos treinta años como consecuencia de la política gubernamental para promover las plantaciones forestales. En los 80's, estimaciones de la Dirección General Forestal del Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca (MGAP) indicaban la existencia de entre 400.000 y 600.000 ha ocupadas por especies nativas de árboles de pequeño diámetro (15-20 cm) de escaso uso industrial, aproximadamente 120.000 a 137.000 ha de *Pinus* y *Eucalyptus*, y 70.000 ha compuestas por otras especies exóticas (MGAP 2005). Actualmente las plantaciones forestales cubren aproximadamente un millón de ha, de las cuales el 25 por ciento del total de la superficie plantada corresponde a *Pinus* sp. y dentro del género, las especies *P. elliotii* y *P. taeda* para madera aserrada y productos de ingeniería de madera comprenden el 39 y 45 por ciento respectivamente. Debido a la similitud de sus propiedades físicas, estas dos especies usualmente son plantadas y se comercializan en el mercado en forma mezclada. Con tasas de crecimiento de 19-24 m³/ha/año y ciclos de corte de 25 años, el país posee excelentes condiciones de crecimiento para las especies de pinos.

Estudios previos realizados en cuerpos de prueba libres de defectos y de dimensiones pequeñas, así como también en piezas de tamaño estructural, permiten inferir que las propiedades físicas y mecánicas de la madera de pinos cultivados en Uruguay podría ser utilizada con fines estructurales (O'Neill & Tarigo 2003, O'Neill 2004, Moya et al. 2013). Parte de esta madera

podría ser empleada en programas de viviendas y así responder parcialmente a la demanda de 60.000-100.000 viviendas de interés social (Montevideo Portal 2013). La incorporación de tecnologías de construcción con madera en la industria de la construcción permitiría además reducir tiempos de ejecución y costos de construcción. Ejemplo de ello es el plan piloto de construcción de cuatro viviendas con estructura de madera de la ciudad de Rivera, realizado en 6 semanas, excluyendo el tiempo de ejecución de los cimientos (MVOTMA 2011).

Pese a esta experiencia y otras tantas exitosas en el país, la madera aserrada en general, y la de pinos en particular, sigue siendo empleada escasamente para fines estructurales. Entre los factores que explican la no-adopción de este material, destacan los prejuicios culturales, el desconocimiento por parte de usuarios y técnicos de las ventajas del material y principalmente la falta de madera clasificada y con especificaciones técnicas disponibles en el mercado local.

Con el propósito de contribuir con información científica y técnica que permita generar las condiciones de confiabilidad necesarias para el uso estructural de maderas nacionales, la Facultad de Arquitectura de la Universidad ORT Uruguay y el Departamento de Proyectos Forestales del LATU, desarrollaron el proyecto "Caracterización estructural de madera aserrada de pinos (*P. elliotii* y *P. taeda*) asociada a grados estructurales". El objetivo principal del proyecto consistió en determinar las propiedades estructurales de la madera aserrada de pinos y su asignación a grados o clases resistentes. La asignación a grados estructurales permitirá agrupar las piezas de madera de acuerdo a su calidad, para poder utilizar cada pieza de madera de forma racional y eficiente.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se desarrolló un programa de ensayo en piezas aserradas de tamaño estructural, previamente clasificadas en forma visual de acuerdo a un criterio tentativo adaptado de la norma chilena NCh 1207-2005. La cantidad de ensayos fue la mínima necesaria como para asegurar validez estadística y representatividad sobre la madera de pinos nacionales disponible en el mercado.

2.1. Características de la muestra y selección de cuerpos de prueba

Con la finalidad de obtener material representativo de la producción nacional, las muestras M1 y M2 provinieron de las plantaciones y aserraderos de dos empresas que comercializan madera en el país: M1, localizada en el litoral, compuesta por árboles de 25 años de edad y de diámetros a altura de pecho (DAP) de 450 mm (promedio), y M2, ubicada en el sur-oeste con árboles de 15 años y de 300 mm de DAP. La composición de especies, similar en ambos muestreos, consistió en 90 por ciento de *P. elliotii* y 10 por ciento de *P. taeda*. El marco de plantación fue de 3 m x 3 m, y 4 m x 2,50 m en M1 y M2 respectivamente. En ambos montes se realizaron raleos a los 5, 7 y 10 años, y en M1 adicionalmente a los 15 años.

De la línea de producción de cada aserradero, se seleccionaron de un total de más de 600, 480 piezas de 60 mm x 170 mm x 3300 mm, totalizando 960 unidades entre ambos muestreos. Mediante evaluación visual de nudosidades y presencia de médula, las piezas fueron pre-clasificadas "in situ" simplificando los lineamientos de NCh1207-2005, en tres grados: grado selecto (GS), grado 1 (G1) y grado 2 (G2). La presencia de médula se consideró como una característica no recomendable para las piezas del grado GS, no tanto por sus implicancias

debilitantes, sino por las consecuencias que su presencia genera sobre la estabilidad dimensional de la pieza durante el proceso de secado y las consiguientes distorsiones geométricas de la misma. Las cabezas de las piezas fueron pintadas a efectos de identificar su grado (**Figura 1**). Todas las piezas de M1 y M2 fueron secadas en el mismo horno y con la misma agenda, hasta alcanzar aproximadamente 18% de contenido de humedad (CH). Luego del secado todas las piezas fueron embaladas en film de polietileno y trasladadas al Departamento de Proyectos forestales del LATU donde fueron cepilladas en sus cuatro caras hasta obtener dimensiones de 50 x 150 x 3200 mm.

Figura 1- Selección y pre-clasificación visual de piezas



2.2. Clasificación de piezas

Las 960 piezas fueron clasificadas nuevamente y en esta oportunidad siguiendo rigurosamente las especificaciones de la NCh 1207-2005. La evaluación se dividió en dos pasos: i) aptitud por alabeos, y ii) clasificación por nudosidades y otros atributos.

i) Aptitud por alabeos

Se entiende por alabeo la distorsión o distorsiones en la geometría de una pieza de madera debido a un incorrecto proceso de secado. Se distinguen cuatro tipos de alabeos, cuya magnitud determina el rechazo de la pieza: encorvadura, arqueadura o combado, torcedura y acanaladura. La forma de medición de alabeos se muestra en la **Figura 2**, y la síntesis del procedimiento para aceptar o rechazar una pieza según los límites de la NCh1207-2005 se describe en la **Figura 3**.

Figura 2- Medición de alabeos: a) encorvadura, b) arqueadura, c) torcedura, y d) acanaladura

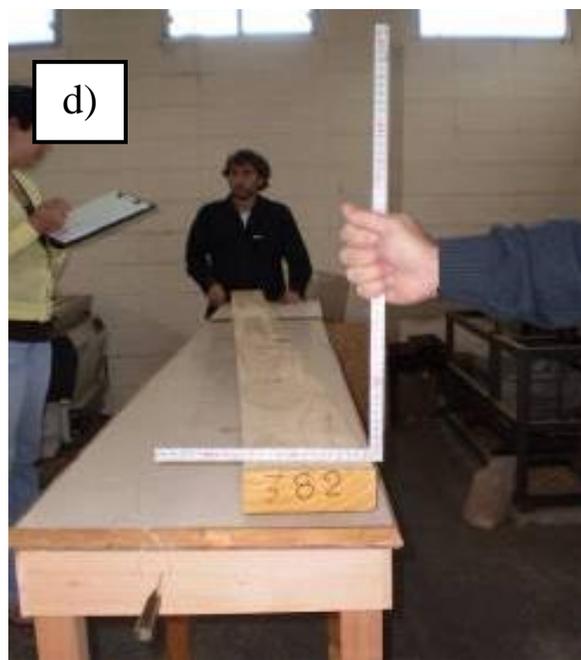
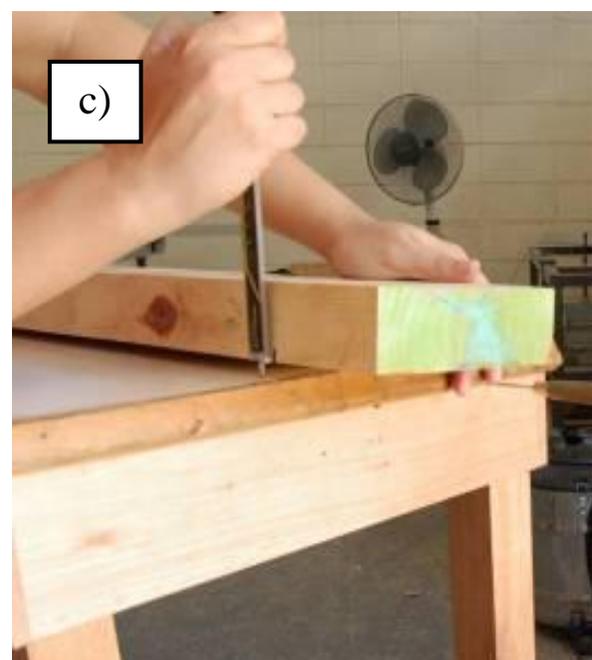
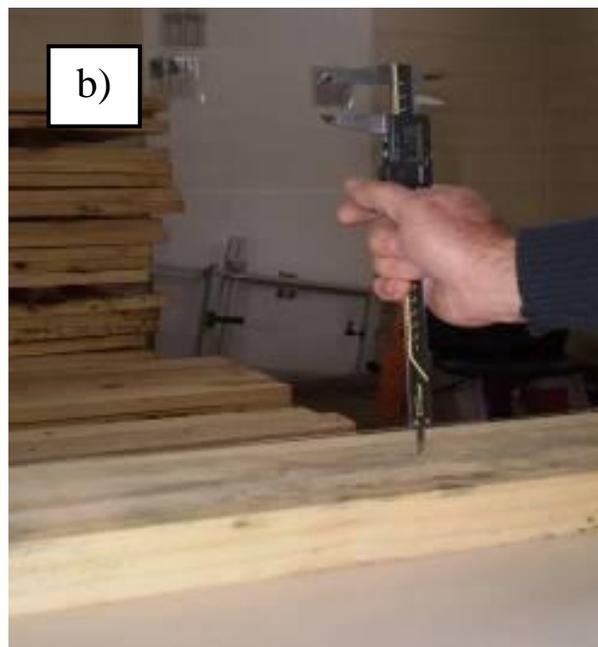
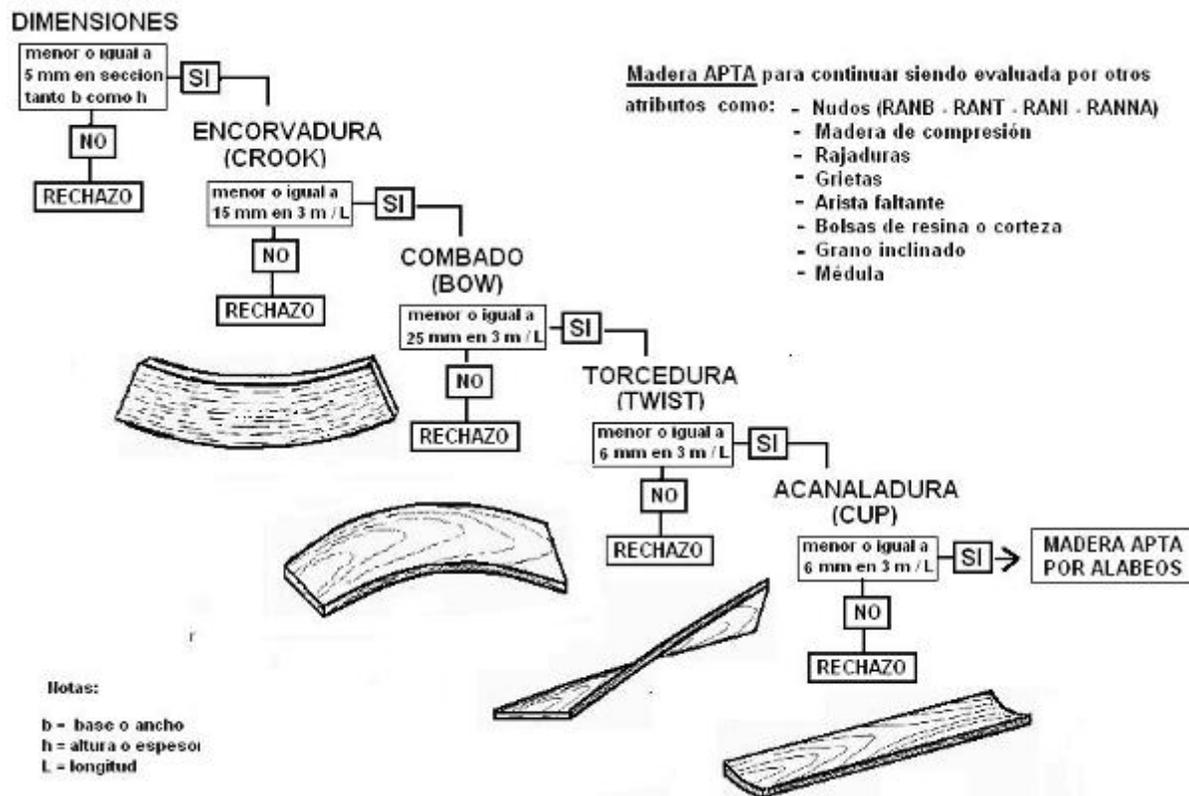


Figura 3- Diagrama de flujo del procedimiento de aptitud por alabeos



ii) Clasificación por nudosidades y otros atributos

Las piezas pre-clasificadas "in situ", fueron re-clasificadas mediante una metodología de laboratorio más rigurosa estructurada sobre la base del control del tamaño, ubicación y frecuencia de los nudos, utilizándose el método de la Razón de Área Nudosa (RAN) de la NCh 1207-2005. Esta clasificación incluyó además la evaluación de otros defectos tales como inclinación de la fibra, arista faltante, bolsillos de resina y corteza, fisuras y médula.

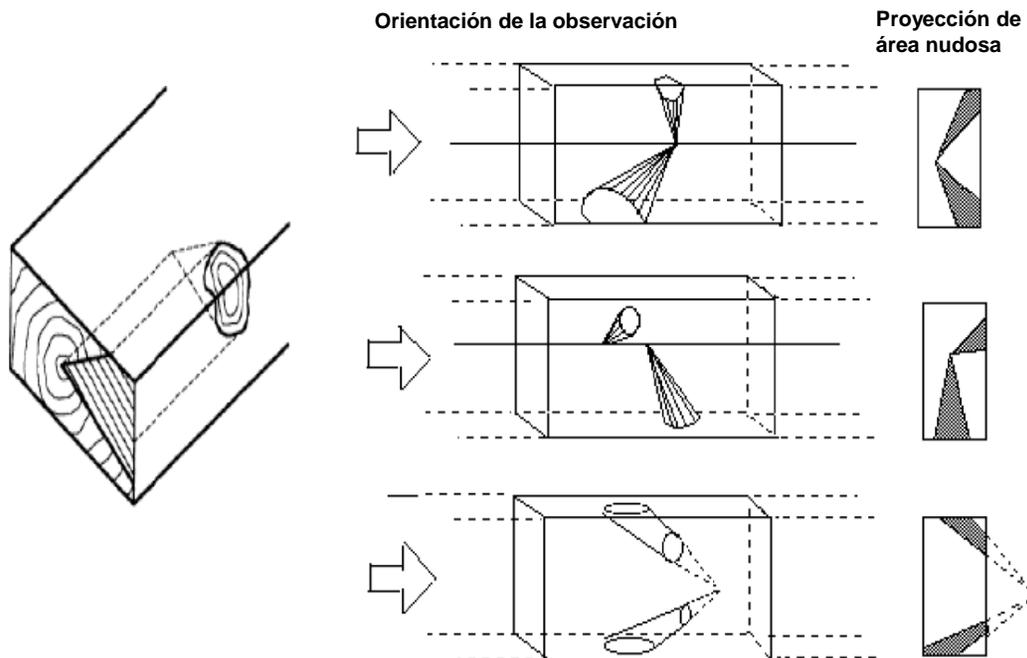
Método de la razón de área nudosa

Para el pino radiata, se ha reportado que la característica de crecimiento que mayor efecto tiene en las propiedades mecánicas es la presencia de nudos, quedando en un segundo lugar los efectos de la incorporación de médula, inclinación de la fibra, velocidad de crecimiento, etc (Wagner 1994). Por este motivo el criterio de clasificación de la NCh 1207-2005 se estructura a partir del control de nudos. En el caso de los pinos (*P. elliotii* y *P. taeda*) cultivados en Uruguay se ha podido observar un comportamiento similar, por lo cual en este proyecto se decidió adoptar el mismo criterio de la norma chilena.

El método RAN consiste en identificar sobre cada pieza, el sector más comprometido por la presencia de características debilitantes y visualizar la geometría de proyección del nudo o grupo

de nudos presentes en ese sector. La proyección de los nudos se dibuja sobre una representación a escala de la sección transversal. En el gráfico se asume que los nudos convergen hacia la médula. A modo de ejemplo la **Figura 4** muestra un esquema de proyección de nudos para estimar RAN.

Figura 4- Esquema de proyección de nudos para la estimación de RAN (Wagner 1994)

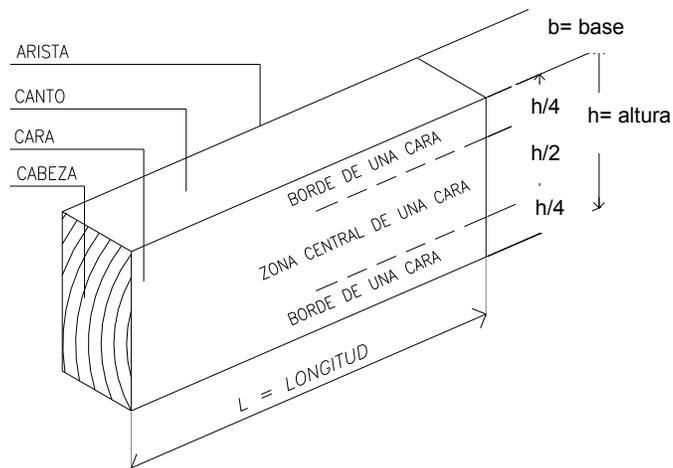


La norma define la razón de área nudosa total (RANT) como el cociente entre la suma de las áreas proyectadas sobre la sección transversal de la pieza de todos los nudos comprendidos en una longitud igual al ancho de la pieza y el área de su sección transversal.

Los nudos ubicados en las zonas de borde se evalúan en forma más severa ya que inducen a la rotura en piezas sometidas a flexión. Así, la NCh 1207-2005 incorpora el concepto de "zonas de borde", con el objetivo de mantener un estándar mínimo de tensión admisible de flexión de 5 MPa, situación que se manifiesta cuando más del 50% de una zona de borde de la sección transversal crítica, se encuentra ocupada por nudos (Wagner 1994).

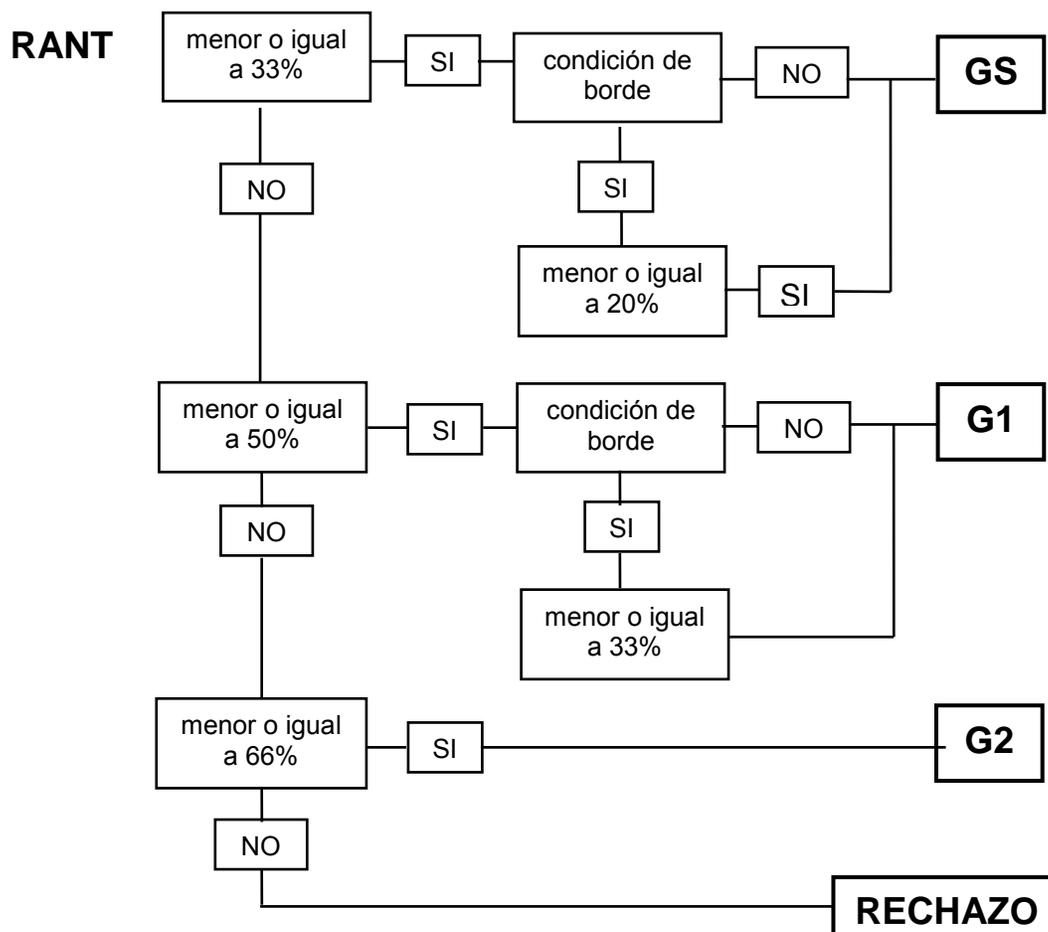
Las zonas de borde se definen como las superficies de la sección transversal adyacentes a los cantos, correspondientes cada una a la cuarta parte del área de la sección transversal de la pieza. La **Figura 5** ilustra este concepto. La razón de área nudosa en las zonas de borde se denomina RANB y se considera como crítica, la más desfavorable de ambas.

Figura 5- Zonas de borde para estimación de RANB



La decisión de asignar una pieza a un grado estructural queda determinada por los límites admisibles para los parámetros RANT y RANB, de manera que las propiedades mecánicas de la pieza se correspondan con los valores asociados a ese grado.

Figura 6- Diagrama de flujo simplificado del procedimiento de clasificación por nudosidades



2.3. Ensayos en el grado

Luego de clasificadas, todas las piezas fueron ensayadas no destructivamente con equipo Fakopp Microsecond Timer y su módulo elástico determinado. El conjunto de piezas fue dividido en tres grupos para ensayos de flexión, compresión y tracción paralela a la fibra. Cada grupo contó con aproximadamente igual cantidad de unidades de cada grado. Tipo de ensayo, número de repeticiones y dimensiones de los cuerpos de prueba se muestran en la **Tabla 1**.

Tabla 1- Tipo, dimensiones y cantidad de ensayos

Tipo de ensayo	Dimensiones (mm)	Cantidad
Flexión	(50 x 150 x 3200)	251
Compresión	(50 x 150 x 3200)	270
Tracción	(50 x 150 x 3200)	273
Densidad de Flexión	(50 x 150 x 25)	251
Densidad de Compresión	(50 x 150 x 25)	270
Densidad de Tracción	(50 x 150 x 25)	273

Las piezas destinadas a ensayos de compresión y tracción fueron embaladas en film de polietileno y enviadas al Instituto Forestal INFOR de Concepción, Chile, donde se le realizaron los ensayos correspondientes. Los ensayos de flexión fueron realizados en el Departamento de Proyectos Forestales del LATU.

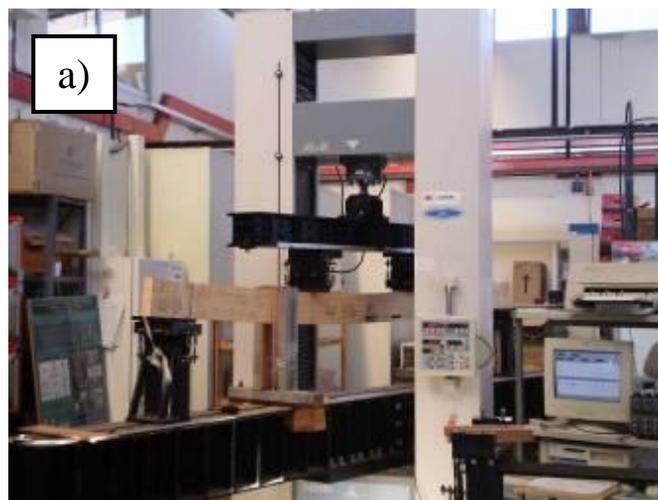
Los ensayos de flexión fueron realizados de acuerdo a ASTM D198-09 (ASTM 2011a), en una máquina universal Minebea con una celda de carga de 250 kN y a velocidad constante. La deformación fue medida con un extensómetro ubicado en el eje de la sección transversal y en la mitad de la luz de la pieza. Para cada tabla se calculó la tensión de rotura (F_m) y el módulo de elasticidad en flexión ($E_{m,0}$). Luego de finalizado el ensayo, de cada tabla se extrajo una probeta para determinar la densidad aparente corriente y el CH de acuerdo a ASTM D 2395-07a (ASTM 2011c).

Los ensayos de compresión paralela fueron realizados de acuerdo a NCh 3028/1 (INN 2006a), en una máquina de ensayo con un marco de carga/reacción de compresión diseñado para una capacidad de 400 kN, con un cilindro hidráulico marca Enerpac de 300 kN de capacidad. La adquisición de datos se realizó en forma digital directa a PC mediante un transductor de presión de 60 MPa de capacidad y 6,9 kPa de sensibilidad, que permite el registro de los datos en forma continua con frecuencias superiores a 100 datos por segundo. Para cada tabla fue determinada la tensión de rotura de compresión ($F_{c,0}$). Luego de finalizado el ensayo, de cada tabla se extrajo una probeta para determinar la densidad aparente corriente y el CH de acuerdo a NCh 3028/1 (INN 2006a).

Los ensayos de tracción paralela a la fibra fueron realizados de acuerdo a NCh 3028/1 (INN 2006a), en una máquina de ensayo Metriguard 403, con una celda de carga de 500 kN, con un sistema compuesto por dos cilindros hidráulicos marca Enerpac de 500 kN de capacidad. La adquisición de datos se realizó en forma digital directa a PC mediante un transductor de presión de 60 MPa de capacidad y 6,9 kPa de sensibilidad. Para cada tabla fue determinada la tensión de

rotura de tracción ($F_{t,0}$). Luego de finalizado el ensayo, de cada tabla se extrajo una probeta para determinar la densidad aparente corriente y el CH de acuerdo a NCh 3028/1 (INN 2006a).

Figura 7- Ensayos de piezas de tamaño estructural: a) flexión, b) tracción paralela- y c) compresión paralela- a la fibra



Ajuste de las propiedades mecánicas y densidad por contenido de humedad. Las propiedades mecánicas fueron ajustadas al 12% de CH de acuerdo a ASTM D2915-97 (ASTM 2000):

$$P_{CH_2} = P_{CH_1} \left[\frac{(\alpha - \beta \times CH_2)}{(\alpha - \beta \times CH_1)} \right] \quad (1)$$

donde P_{CH_1} es la propiedad determinada al CH_1 (en porcentaje), y α y β son constantes de humedad.

La densidad fue ajustada al 12% de CH de acuerdo a (USDA1999):

$$D_2 = \frac{D_1}{[1 - 0.265(30 - CH_2)/100D_1]} \quad (2)$$

donde D_2 es la densidad al CH deseado CH_2 (en porcentaje) y D_1 es la densidad básica (peso seco y volumen verde).

2.4. Análisis de datos y derivación de tensiones

Estudios previos (Moya et al. 2013) mostraron diferencias significativas entre las propiedades mecánicas de cuerpos de prueba libre de defectos y de pequeñas dimensiones de M1 y M2. Para verificar esta observación en piezas de tamaño estructural, las propiedades de flexión, compresión paralela, tracción paralela y densidad fueron sujetas a análisis de varianza (ANOVA). Todos los tests fueron realizados con un límite de confianza de 95%.

El procedimiento de derivación de tensiones de los grados estructurales se realizó de acuerdo a ASTM D 2915-10 (ASTM 2011d), limitando el percentil de exclusión al 5% y con una confiabilidad estadística recomendada para piezas estructurales del 75%. Para cada grupo, los datos fueron ordenados en orden creciente y la estadística descriptiva estimada. Para cada propiedad el percentil del 5% también denominado "valor característico" (F_k), quedó definido por el valor de ensayo asociado a la estadística de orden que corresponde al 5 por ciento del tamaño de la muestra. Cuando este valor no coincidió con un resultado experimental, se realizó interpolación lineal entre los dos valores más cercanos.

Adicionalmente, se consideró pertinente estimar valores admisibles de tensiones, ya que en el medio internacional coexisten reglamentos para el diseño estructural basados en el formato de los estados límites y de las tensiones admisibles. Estos reglamentos son generalmente adoptados indistintamente por los proyectistas de estructuras en Uruguay debido a la inexistencia de normativa en el ámbito nacional.

Los valores de tensiones admisibles, también denominados de diseño de referencia, de flexión, compresión paralela y tracción paralela, fueron determinados de acuerdo a ASTM D1990-07 (ASTM 2011b):

$$F_{adm} = \frac{F_k}{n} \quad (3)$$

donde F_{adm} es la tensión admisible, F_k es la tensión característica y n es un coeficiente de ajuste que incluye una corrección por duración de carga de 10 años y un factor de seguridad; $n=2,1$ para flexión y tracción paralela a la fibra, y $n= 1,9$ para compresión paralela a la fibra. Los valores característicos y admisibles fueron referidos al 12% de CH.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La clasificación visual realizada en laboratorio confirmó al 80% de las piezas en sus grados iniciales (GS, G1 o G2), asignó a otro grado distinto al inicial al 7% y rechazó (fundamentalmente por alabeos) al 11% de las piezas (**Tabla 2**).

Tabla 2- Cantidad de piezas clasificadas según NCh 1207

Grado	Cantidad
GS	293
G1	292
G2	255
R	111
Total	951

Diferencias entre los muestreos

Los resultados de ANOVA mostraron diferencias significativas entre las piezas de los muestreos M1 y M2 (**Tabla 3**), por lo cual se decidió continuar el análisis de las propiedades de cada muestreo en forma independiente uno del otro.

Tabla 3- Resultados de ANOVA de propiedades mecánicas de piezas de madera de tamaño estructural provenientes de los muestreos M1 y M2¹

Valores de p- M1 vs M2 para las propiedades:				
E_o ²	F_m ³	$F_{c,0}$ ⁴	$F_{t,0}$ ⁵	ρ ⁶
p<0,001	p<0,001	p<0,001	p<0,001	p<0,001

¹M1 y M2 corresponden a piezas de árboles de 25 años del litoral, y de 15 años del suroeste respectivamente

²Módulo de elasticidad en flexión

³Tensión de rotura en flexión

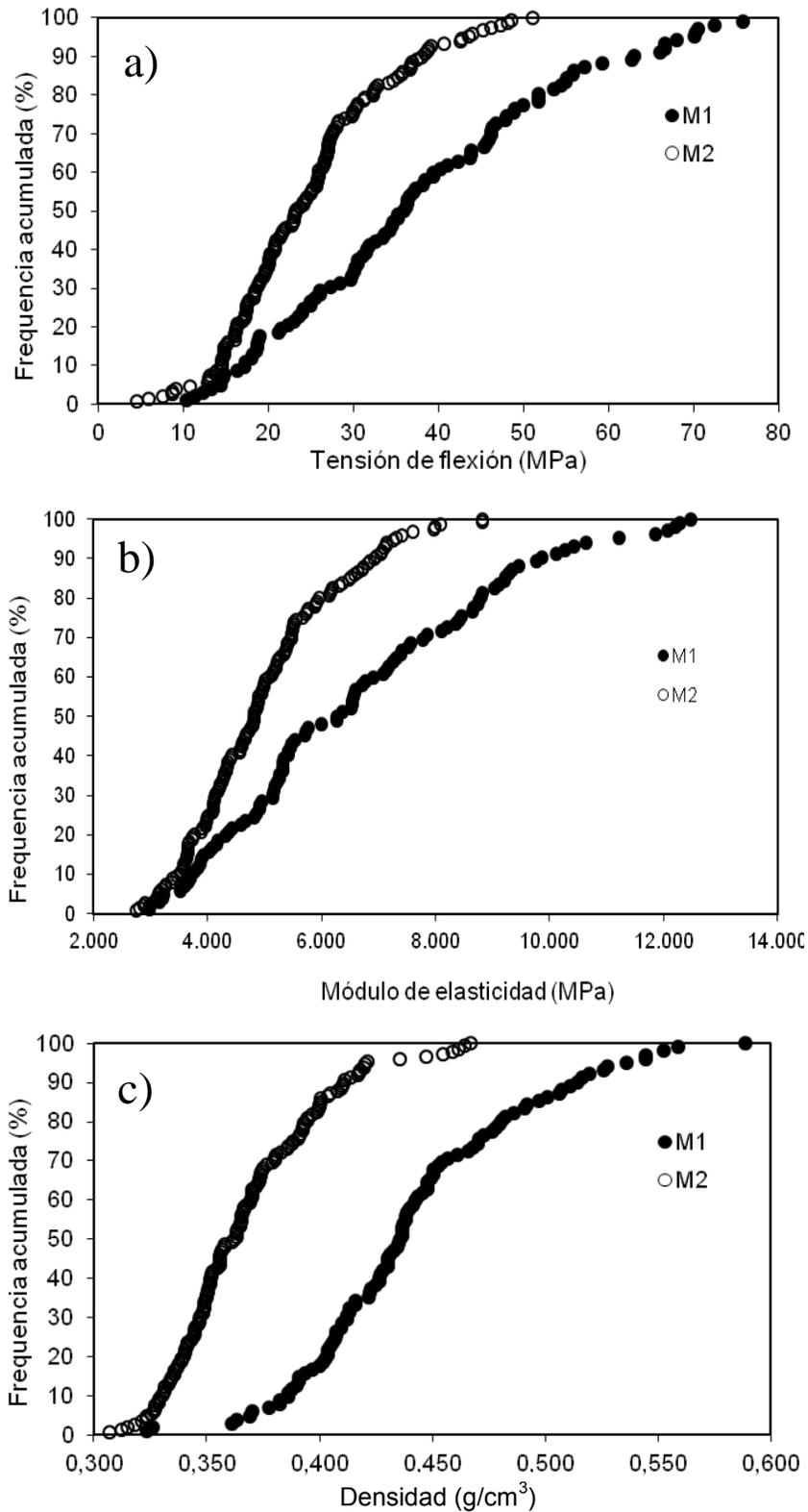
⁴Tensión de rotura en compresión paralela a la fibra

⁵Tensión de rotura en tracción paralela a la fibra

⁶Densidad

Adicionalmente, con el fin de analizar las características de las frecuencias de distribución de las muestras, la **Figura 8** presenta las curvas de frecuencia acumulada para las propiedades de flexión y densidad de cada muestreo.

Figura 8- Frecuencias acumuladas de: a) tensión de rotura de flexión b) módulo de elasticidad y c) densidad, de piezas de madera de tamaño estructural por muestreo



Las **Tablas 4 y 5** sintetizan los resultados de los ensayos mecánicos de las piezas clasificadas visualmente en los tres grados para cada muestreo.

Tabla 4- Propiedades de flexión y densidad de cuerpos de prueba de tamaño estructural

Muestreo	Grado	Nº rep	$E_{0,med}^1$ [MPa]	$F_{m,med}^2$ [MPa]	$F_{m,k}^3$ [MPa]	$F_{m,adm}^4$ [MPa]	ρ_{med}^5 [kg/m ³]	ρ_k^6 [kg/m ³]
M1	GS	55	7391	47	24	11	460	383
	G1	31	5876	31	12	6	423	348
	G2	16	5484	23	11	5	414	360
M2	GS	29	5599	29	15	7	378	328
	G1	76	4981	26	15	7	368	323
	G2	44	4579	20	6	2,8	360	320

¹ $E_{0,med}$: Módulo de elasticidad medio en flexión

² $F_{m,med}$: Tensión de rotura media en flexión

³ $F_{m,k}$: Tensión de rotura característica en flexión

⁴ $F_{m,adm}$: Tensión admisible de flexión

⁵ ρ_{med} : Densidad media

⁶ ρ_k : Densidad característica

Tabla 5- Propiedades de compresión paralela y tracción paralela a la fibra de cuerpos de prueba de tamaño estructural

Muestreo	Grado	$F_{c,0}$			$F_{t,0}$		
		Nº rep	$F_{c,med}^1$ [MPa]	$F_{c,k}^2$ [MPa]	Nº rep	$F_{t,med}^3$ [MPa]	$F_{t,k}^4$ [MPa]
M1	GS	91	26	20	77	33	14
	G1	36	13	16	43	20	9
	G2	22	19	13	35	10	4
M2	GS	20	23	17	34	17	8
	G1	55	20	15	50	12	8
	G2	46	18	11	34	9	4

¹ $F_{c,med}$: Tensión de rotura media en compresión paralela a la fibra

² $F_{c,k}$: Tensión de rotura característica en compresión paralela a la fibra

³ $F_{t,med}$: Tensión de rotura media en tracción paralela a la fibra

⁴ $F_{t,k}$: Tensión de rotura característica en tracción paralela a la fibra

Asignación de piezas a grados estructurales

Los resultados de los ensayos mecánicos de las piezas clasificadas en los tres grados fueron comparados con los valores de las propiedades establecidos para las clases resistentes y los grados estructurales de EN 338 (CEN2003a) y de la NCh 1198 (INN 2006c) respectivamente. Estas normas establecen para cada grado una familia de tensiones asociada, siendo fundamentalmente las propiedades de flexión y densidad las que determinan la asignación de la pieza a un determinado clase o grado.

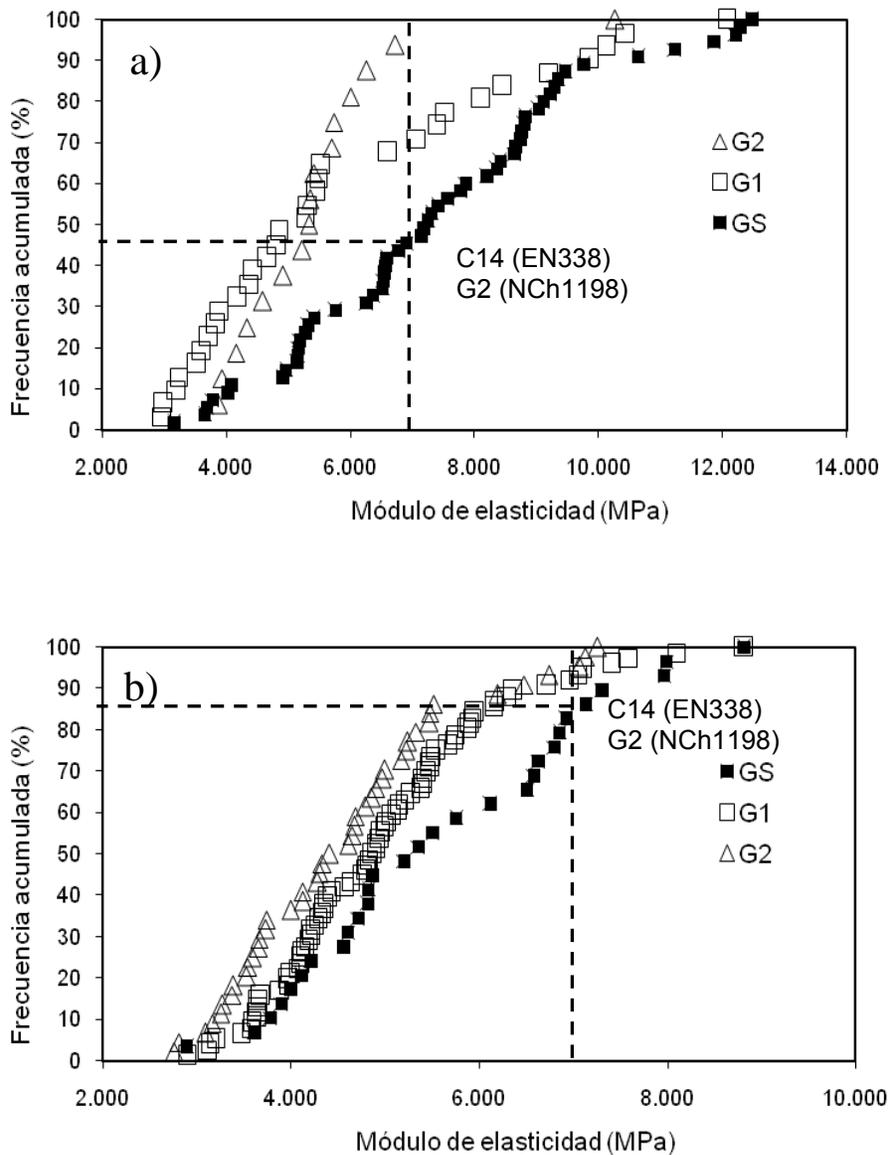
Basado en los límites de rigidez ($E_{0,med}=7.000\text{MPa}$), resistencia a la flexión ($F_{m,k}=14\text{MPa}$) y densidad ($\rho_k=290\text{ kg/m}^3$) establecidos en EN 338 para madera de coníferas, únicamente las piezas del muestreo M1 agrupadas en GS pueden ser asignadas a la clase resistente C14 (**Tabla 4**).

Si se compara con los límites ($E_{0,med}=7.300\text{MPa}$, $F_{m,adm}=4,7\text{MPa}$, $\rho_k=370\text{ kg/m}^3$) definidos en NCh1198 para madera de pino radiata, las piezas del muestreo M1 agrupadas en GS pueden ser asignadas al grado estructural G2.

En ambas comparaciones, la calificación queda determinada por el valor más bajo de las tres propiedades, que responde en este caso a los del módulo de elasticidad de la madera. En la **Figura 9** se observa que el 46% de las piezas clasificadas como GS del muestreo M1 presenta valores de módulo de elasticidad igual o mayores a los establecidos en EN 338, mientras que el porcentaje se reduce a 12% para las piezas GS del muestreo M2. La asignación es similar con respecto a los valores de referencia de la NCh 1198.

Considerando las exigencias normativas internacionales vigentes en los países con tecnología de construcción en madera, que admiten piezas que garanticen valores de tensión característica y de módulo de elasticidad en flexión de al menos 14 MPa y 5.660 MPa respectivamente, se podría establecer otro grado estructural para piezas de menor escuadría a la ensayada en este proyecto, por ejemplo 2" x 4" (45 mm x 90 mm), usualmente empleada como "pie derechos" en estructuras de entramados ligeros. De esta forma, podría utilizarse en forma más eficiente la madera de los grados inferiores de M1, y sobre todo la madera proveniente del muestreo M2.

Figura 9- Frecuencias acumuladas de módulo de elasticidad en flexión para los tres grados de piezas de madera de tamaño estructural provenientes de: a) árboles de 25 años provenientes del litoral, y b) árboles de 15 años del suroeste



4. CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio sugieren que la madera proveniente de árboles de 25 años cultivados en el litoral de Uruguay puede ser utilizada con fines estructurales.

Los valores característicos de la tensión de flexión y densidad, y el valor medio del módulo de elasticidad permiten asignar la madera del grado selecto de árboles de 25 años a la clase resistente C14, y al grado estructural G2 establecidos en EN 338 y NCh 1198 respectivamente.

Adicionalmente, se podría establecer otro grado estructural para la madera proveniente de árboles de 15 años del suroeste, recomendable para escuadrías de 45mm x 90 mm, que podría ser empleado como “pie derechos” en estructuras de entramado ligero.

Para dar mayor peso a estas conclusiones es necesario continuar realizando ensayos que provean un respaldo estadístico superior al exhibido en este proyecto. También es crucial investigar otras propiedades que son relevantes para el uso de la madera como material estructural.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII), Fondo María Viñas- PR-FMV-2009-1-2772 por los fondos para este proyecto.

Especial agradecimiento a Marine Getti, Juan Manuel González, Marcelo Pécora y Lorena Tovagliares, por su generosa colaboración.

BIBLIOGRAFIA

American Society for Testing and Materials. (2000). *Standard practice for evaluating allowable properties for grades of structural lumber*. (ASTM D2915-97). Conshohocken, Pennsylvania: ASTM, West.

ASTM International. (2011a). *Standard test methods of static tests of lumber in structural sizes*. (ASTM D198-09). Conshohocken, Pennsylvania: ASTM, West.

ASTM International. (2011b). *Standard practice for establishing allowable properties for visually graded dimension lumber from in-grade test of full-size specimens*. (ASTM D1990-07). Conshohocken, Pennsylvania: ASTM, West.

ASTM International. (2011c). *Standard practice for specific gravity of wood and wood-based materials*. (ASTM D2395-07a). Conshohocken, Pennsylvania: ASTM, West.

ASTM International. (2011d). *Standard practice for sampling and data-analysis for structural wood and wood-based panels*. (ASTM D2915-10). Conshohocken, Pennsylvania: ASTM, West.

Comité Européen de Normalisation. (2003a). *Structural timber-strength classes*. (EN 338). Brussels: CEN.

Comité Européen de Normalisation. (2003b). *Timber structures: Structural timber and glued laminated timber. Determination of some physical and mechanical properties*. (EN 408). Brussels: CEN.

Comité Européen de Normalisation. (2004). *Structural timber: Determination of characteristic values of mechanical properties and density*. (EN 384). Brussels: CEN.

Fernández-Golfín, J. I.; Díez, M.R. & Hermoso, E. (2001). Análisis y estado del arte de la técnica de clasificación mecánica por máquina de la madera aserrada estructural. *Revisión. Invest. Agr.: Sist. Recur. For.* 1(10), 5-19.

Instituto Nacional de Normalización, Chile. (2005). *Pino radiata. Clasificación visual para uso estructural. Especificaciones de los grados de calidad*. (NCh 1207-Of 2005). Santiago: INN.

Instituto Nacional de Normalización, Chile. (2006a). *Madera estructural. Determinación de propiedades físicas y mecánicas de la madera clasificada por su resistencia. Parte 1: Métodos de ensayo en tamaño estructural*. (NCh 3028/1-Of 2006). Santiago: INN.

Instituto Nacional de Normalización, Chile. (2006b). *Madera estructural. Determinación de propiedades físicas y mecánicas de la madera clasificada por su resistencia. Parte 2: Muestreo y evaluación de los valores característicos de piezas en tamaño estructural*. (NCh 3028/2-Of 2006). Santiago: INN.

Instituto Nacional de Normalización. (2006c). *Madera - Construcciones en madera: Cálculo*. (NCh 1198). Santiago: INN.

Montevideo Portal. (2013). *MVOTMA trabaja en seis líneas para resolver problemas de vivienda en Uruguay*. Accedido en julio, 2013 desde <http://www.uruguaysustentable.com.uy/politica-economia/mvotma-trabaja-en-seis-lineas-para-resolver-problemas-de-vivienda-en-uruguay/>

Moya, L.; Laguarda, M.F.; Cagno, M.; Cardoso, A. & O'Neill, H. (2013). Physical and mechanical properties of loblolly and slash pine wood from uruguayan plantations. *Forest Prod J.* 63(3/4), 128-137.

Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente. (2011). *Sistemas constructivos no tradicionales*. Accedido en enero, 2014 desde <http://www.mvotma.gub.uy/tu-vivienda/construir/sistemas-constructivos-no-tradicionales>

O'Neill, H. (2004). *Estimación de la calidad de la madera producida en el Uruguay para uso estructural y su evaluación en servicio por métodos no destructivos*. (Nota técnica). Montevideo: Laboratorio Tecnológico del Uruguay,

O'Neill, H. & Tarigo, F. (2003). *Comportamiento en flexión de E. grandis, P. taeda y P. elliottii de madera de tamaño real y de pequeñas probetas sin defectos*. (Nota técnica). Montevideo: Laboratorio Tecnológico del Uruguay,

Steiger, R. & Arnold, M. (2009). Strength grading of Norway spruce structural timber: revisiting property relationships used in EN 338 classification system. *Wood Science and Technology*, 43, 259-278.

US Department of Agriculture. (1999). *Wood Handbook: Wood as an engineering material*. (General Technical Report FPL-GTR-113). Madison, Wisconsin: USDA Forest Service, Forest Products Laboratory.

Wagner, M. (1994). *Clasificación de la madera aserrada de pino radiata*. (Notas de clase). Concepción, Chile: Universidad de Bío-Bío.