

INFLUENCIA DE LAS DIMENSIONES DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL SOBRE LA RESISTENCIA A FLEXIÓN EN MADERA ASERRADA DE *Populus deltoides* CULTIVADO EN ARGENTINA

SIZE EFFECT ON BENDING STRENGTH IN SAWN TIMBER OF ARGENTINEAN *Populus deltoides*

Alfredo A. Guillaumet¹, Roberto D. Manavella¹, Luis Acuña Rello², Juan C. Piter^{3,*}

RESUMEN

En el artículo se analiza el efecto de las dimensiones de la sección transversal sobre la resistencia a flexión en piezas de madera aserrada de *Populus deltoides* ‘Australiano 129/60’ y ‘Stoneville 67’, cultivados en el delta del río Paraná, Argentina. El programa experimental se llevó a cabo según las normas europeas sobre un total de 820 cuerpos de prueba separados en 5 muestras exhibiendo las dimensiones estructurales usuales. Los resultados mostraron que el aumento de la altura de la sección fue acompañado de una tendencia decreciente de la tensión de rotura en flexión, pero no permiten afirmar que esa relación está vinculada a la calidad de la madera. Se confirmó que puede despreciarse una correlación entre la resistencia y el ancho de la sección. El análisis puso en evidencia que la relación entre la altura de la sección y la resistencia del material investigado está adecuadamente expresada por el criterio europeo, el cual fue adoptado por la normativa de Argentina.

Palabras clave: Álamo, densidad, factor de tamaño, madera estructural, propiedades mecánicas.

ABSTRACT

The present paper reports the results of an investigation regarding the study of size effects on bending strength in sawn timber of Argentinean *Populus deltoides* ‘Australiano 129/60’ and ‘Stoneville 67’. An empirical research project with 5 samples containing a total of 820 specimens in usual structural sizes was carried out according to European standards. Results showed that strength decreases when depth increases but no clear influence of either the timber quality or the specimen thickness on size effects was found. The analysis evidenced that the European criterion -adopted by Argentinean standards- is suitable for considering the influence of depth on bending strength in the investigated species.

Keywords: Density, mechanical properties, Poplar, size factor, structural timber.

INTRODUCCIÓN

El álamo pertenece a la familia de las salicáceas, que constituye el tercer cultivo forestal en importancia de Argentina, siendo precedido por el de pinos y eucaliptos (Achinelli *et al.* 2004). El álamo es originario del hemisferio norte y comprende unas 40 especies, a las que se deben agregar

¹Grupo de Investigación y Desarrollo de Estructuras Civiles, Facultad Regional Venado Tuerto, Universidad Tecnológica Nacional, Buenos Aires, Argentina.

²Depto. Ing. Agr. y Forestal, E.T.S. de Ingenierías Agrarias, Universidad de Valladolid, Valladolid, España.

³Grupo de Estudio de Maderas (GEMA), Depto. de Ing. Civil, Facultad Regional Concepción del Uruguay, Universidad Tecnológica Nacional, Buenos Aires, Argentina.

*Autor para correspondencia: piterj@frcu.utn.edu.ar

Recibido: 25.01.2016 Aceptado: 03.07.2016

numerosos híbridos y clones. En el delta del río Paraná (Argentina) se cultiva en albardones naturales o áreas protegidas de las inundaciones, donde se llevó a cabo un trabajo de reconversión clonal durante los últimos 20 años. A partir de ese trabajo, se destacan en la actualidad por su creciente importancia los clones *Populus deltoides* 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67' (Borodowski 2006, Cortizo 2005).

El uso estructural de la madera obtenida de estos dos clones fue impulsado por el sector productivo regional vinculado a la elaboración de madera aserrada y laminada encolada, el cual fue acompañado por el sector académico-científico del país. En los últimos años se llevaron a cabo investigaciones orientadas a conocer el comportamiento físico-mecánico de este material y a evaluar su rendimiento técnico y económico (Guillaumet *et al.* 2014a,b; Ramos *et al.* 2014a,b). También se han publicado resultados que comparan el comportamiento estructural de la madera de estos clones con el del pino resinoso (Fank *et al.* 2014b), siendo esta última una especie de referencia por su importancia en el país.

En el plano de la normalización, la reciente norma IRAM 9662-4 (2015) adopta un método visual de clasificación por resistencia y provee los valores característicos de las principales propiedades para dos grados estructurales. La inexistencia de diferencias significativas en el comportamiento físico-mecánico de la madera obtenida de ambos clones y la dificultad práctica de distinguirlas en el mercado, motivaron que la norma mencionada aplique tanto el método de clasificación como los valores característicos de las propiedades en forma indistinta al material obtenido de los dos clones ya mencionados. A partir de los valores característicos de las propiedades provistos por la norma IRAM 9662-4 (2015) se derivaron los valores de diseño de referencia para cada grado estructural según los lineamientos del Reglamento Argentino de Estructuras de Madera (INTI CIRSOC 2013). Éstos fueron incorporados a los suplementos del reglamento para ser utilizados por los proyectistas estructurales (INTI CIRSOC 2015).

La influencia del tamaño de la sección transversal sobre la resistencia a flexión es considerada por las reglas de diseño nacionales siguiendo la experiencia europea (EN 384 2010), según la cual la tensión de rotura decrece al aumentar la altura de la viga (h , expresada en mm) acorde a la relación formulada por el factor $k_h = (150 / h)^{0.2}$, y es independiente de su ancho. La adopción de este criterio implica tomar como "altura de referencia" el valor de 150 mm, que resulta adecuado considerando el tamaño de las piezas estructurales habitualmente producidas en Argentina.

A nivel internacional se conocen numerosos estudios referidos a la influencia del tamaño de la sección transversal sobre la tensión de rotura en flexión, motivados inicialmente por la evidencia empírica que ha mostrado -en maderas de similar calidad- un incremento de la resistencia para una disminución de la sección. Según la proposición de Newlin and Trayer (1924), las fibras sometidas a compresión son propensas a fallar por la inestabilidad de su equilibrio y las menos solicitadas por su cercanía al eje neutro contribuyen significativamente con la estabilidad de las restantes en las vigas de menor altura, lo que explica el incremento de la resistencia a flexión en esos casos.

La teoría clásica del eslabón más débil (Weibull 1939) fue extendida para analizar este material estructural incorporando conceptos relacionados al particular comportamiento mecánico de la madera y a las modalidades de producción (Rouger 1995, Rouger and Barrett 1995). Barret *et al.* (1992) publican que el efecto del tamaño de la sección transversal sobre la resistencia a flexión presenta variaciones en función de la calidad, en madera de coníferas clasificada visualmente. Hermoso *et al.* (2002) y Hermoso *et al.* (2013) reportan que el efecto del tamaño de la sección sobre la resistencia es mayor en la madera de menor calidad, a partir de estudios realizados en España sobre el pino silvestre y el pino radiata, respectivamente. En cambio, Piter (2012) no encontró una clara relación entre la calidad de la madera y el efecto de la altura sobre la resistencia a flexión, según resultados publicados a partir de una investigación realizada con madera de *E. grandis* de Argentina. Denzler and Glos (2008), sobre la base de un estudio de la influencia directa e indirecta del tamaño de la sección sobre la resistencia a flexión en madera de spruce europeo, afirman que esa influencia está relacionada también a los métodos de ensayo y de clasificación empleados.

En el plano normativo internacional, y si bien con disímiles criterios influenciados por la diversidad de tradiciones y por la multiplicidad de combinaciones especie / zona de cultivo, las normas y reglas de diseño de diferentes países consideran el efecto del tamaño de la sección sobre la resistencia a flexión.

La determinación de ese efecto tiene en cuenta en algunos casos la especie -o grupo de especies-, como el criterio adoptado en Chile (NCh 1198 2007), y en otros casos considera el grado estructural, como el adoptado en Estados Unidos de Norteamérica (NDS 2012).

Se conocen también reportes referidos a la temática que informan sobre especies cultivadas en Argentina. Piter (2012), a partir de un estudio llevado a cabo sobre 5 muestras con distintas dimensiones de uso estructural incluyendo 349 cuerpos de prueba de *E. grandis* cultivado en las provincias mesopotámicas, confirma en el material analizado la efectividad del criterio europeo. Resultados de un proyecto llevado a cabo con madera de pino resinoso del noreste del país fueron publicados por Fank et al. (2014a). En este caso, donde se ensayaron 3 muestras con distintas dimensiones estructurales, se reporta solo una relativa efectividad del criterio europeo para estimar la relación entre la altura de la sección y la tensión de rotura.

No obstante la amplia experiencia europea, en la cual se apoya la relación adoptada por las reglas de diseño nacionales (INTI CIRSOC 2013), los resultados más arriba mencionados y la diversidad de combinaciones especie / zona de cultivo existentes en el país, sustentan la necesidad de verificar para cada caso la efectividad del criterio adoptado. En este marco se inscribe el proyecto cuyos resultados se presentan en este artículo, el cual se basó en un extenso programa empírico que involucró cuerpos de prueba con las dimensiones usuales en la utilización estructural de la madera de los dos clones de álamo ya mencionados.

El objetivo de este trabajo es presentar y discutir los resultados de una investigación experimental orientada a conocer la influencia que el tamaño de la sección transversal ejerce sobre la tensión de rotura a flexión en piezas aserradas de *Populus deltoides* 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67' cultivados en el delta del río Paraná. En particular se analiza la efectividad del criterio europeo -adoptado por las reglas de diseño de Argentina- para valorar la influencia antes mencionada en cuerpos de prueba de tamaño usual asignados a distintos grados estructurales.

MATERIALES Y MÉTODOS

El material experimental se seleccionó al azar de la producción de madera aserrada proveniente de una plantación de *P. deltoides* 'Australiano 129/60' de 13 años de edad y una de 'Stoneville 67' con 16 años, ambas radicadas en el delta del río Paraná. En ambos cultivos, las prácticas silviculturales y las edades de corte fueron representativas de la población a analizar. Conforme al objetivo de este proyecto, se eligieron 5 muestras en las cuales estuvieron representadas todas las secciones transversales destinadas al uso estructural del material (Tabla 1). Luego de secadas, las piezas fueron trasladadas al Laboratorio de la Facultad Regional Venado Tuerto de la UTN. Luego de una primera inspección visual se descartaron las que exhibían ataques biológicos, ya que éstos no son admitidos en el uso estructural de esta madera (IRAM 9662-4 2015).

Luego del cepillado, se prepararon los cuerpos de prueba con una longitud igual a 20 veces su alto (h) nominal y luego se colocaron en una cámara con una temperatura de 20 ± 2 °C y una humedad relativa ambiente de 65 ± 5 %. La Tabla 1 informa sobre las características de las 5 muestras que abarcaron un total de 820 cuerpos de prueba. Considerando la importancia que las dimensiones de la sección transversal tienen en el desarrollo de este trabajo, y con el fin de facilitar la interpretación de los resultados, en la denominación de cada muestra se incluyó como subíndice el valor nominal del ancho y del alto de los cuerpos de prueba que la integran.

Tabla 1. Muestras preparadas para el trabajo experimental.

Muestra	Cantidad de cuerpos de prueba (n)		Dimensiones de la sección transversal (mm)			
			Valor nominal		Valor real medio luego del cepillado	
			Ancho (b)	Alto (h)	Ancho (b)	Alto (h)
1 _{100x25}	‘Australiano 129/60’	287	100	25 ⁽¹⁾	103,4	22,8
	‘Stoneville 67’	150				
2 _{50x75}	‘Australiano 129/60’	48	50	75	46,8	78,3
	‘Stoneville 67’	48				
3 _{25x100}	‘Australiano 129/60’	65	25	100	23,4	99,4
	‘Stoneville 67’	49				
4 _{50x100}	‘Australiano 129/60’	49	50	100	46,6	101,4
	‘Stoneville 67’	48				
5 _{50x150}	‘Australiano 129/60’	38	50	150	44,1	148,0
	‘Stoneville 67’	38				

⁽¹⁾: El alto (h) es menor que el ancho (b) porque esta muestra se preparó con tablas destinadas a ensayos de flexión de plano.

Los parámetros visuales fueron registrados conforme al criterio de las normas UNE-EN 1310 (1997) e IRAM 9662-4 (2015). El material fue clasificado visualmente por resistencia según el método adoptado por IRAM 9662-4 (2015), designándose como Residuo todo aquel que no cumplió los requisitos establecidos para ser asignado a los dos grados (Grado 1 y Grado 2) previstos por la norma.

Los ensayos se realizaron de acuerdo a las prescripciones de la norma EN 408 (2010). Las cargas se aplicaron en los tercios de la separación entre apoyos (siendo ésta igual a 18 veces la altura (h) del cuerpo de prueba) por medio de una máquina de ensayos universales con precisión igual a 1 % y capacidad de desplazar el cabezal con velocidad constante. En los puntos de apoyo y de aplicación de la carga se colocaron placas de acero de ancho igual a la mitad de la altura de la viga, con el objeto de reducir el aplastamiento localizado de la madera. Para impedir el pandeo lateral, en los cuerpos de prueba de las muestras 3_{25x100} y 5_{50x150} se ubicaron dispositivos especiales capaces de proporcionar arriostamiento lateral sin obstaculizar las deformaciones verticales. La tensión de rotura en flexión (f_m) se determinó con la expresión convencional provista por la norma EN 408 (2010). El valor de f_m ajustado a una altura de referencia de 150 mm (f_{m150}) se llevó a cabo según el criterio de la norma EN 384 (2010) como $f_{m150} = f_m / k_h$, siendo $k_h = (150 / h)^{0,2}$ con la altura (h) expresada en mm.

El contenido de humedad y la densidad se determinaron según las normas ISO 3130 (1975) e ISO 3131 (1975), respectivamente, luego de finalizado el ensayo. Para este fin se empleó un trozo de sección obtenido en las proximidades de la zona de rotura, abarcando toda la sección transversal, y libre de defectos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 2 exhibe, en forma discriminada para las 5 muestras, los principales resultados obtenidos experimentalmente para la tensión de rotura en flexión (f_m). La tabla presenta también los resultados de la densidad (ρ) ajustada a un contenido de humedad de referencia del 12 % conforme a la norma EN 384 (2010), los cuales son congruentes con los adoptados por la norma IRAM 9662-4 (2015) y con los publicados por Fank *et al.* (2014b) a partir de un trabajo empírico llevado a cabo sobre 307 cuerpos de prueba del mismo material. El contenido de humedad en los 820 cuerpos de prueba ensayados alcanzó un valor medio igual a 12,2 % con una desviación estándar de 1,6 %.

Se observa en esta tabla una tendencia decreciente de los valores medios de f_m al aumentar la altura (h) de los cuerpos de prueba tanto en las 3 muestras con cuerpos de igual ancho (2_{50x75}, 4_{50x100} y 5_{50x150}) como en la que exhibe los de mayor ancho (1_{100x25}) y en aquella con el menor (3_{25x100}), lo cual revela la existencia de una relación entre f_m y h. Por otra parte, es de destacar que los valores medios de f_m en las muestras 3_{25x100} (41,3 N/mm²) y 4_{50x100} (42,4 N/mm²) presentan una diferencia exigua (menor a 3 %) si se tiene en cuenta la variabilidad natural del material, y las dos exhiben la misma desviación estándar

(11,2 N/mm²). Considerando que 3_{25x100} y 4_{50x100} contienen cuerpos de prueba con la misma altura nominal (100 mm) pero el ancho de los mismos en la última (50 mm) es el doble que en la primera (25 mm), estos resultados sugieren la inexistencia de una relación entre f_m y el ancho de la sección. La dispersión de resultados de f_m fue similar en las 5 muestras, con valores de la desviación estándar variando entre 9,9 N/mm² y 11,7 N/mm².

Tabla 2. Principales resultados obtenidos para la tensión de rotura (f_m) y la densidad (ρ).

		Muestras				
		1 _{100x25} n = 437	2 _{50x75} n = 96	3 _{25x100} n = 114	4 _{50x100} n = 97	5 _{50x150} n = 76
f_m (N/mm ²)	Mínimo	26,1	25,1	16,6	19,4	16,2
	Medio	54,8	44,6	41,3	42,4	37,8
	Máximo	81,4	72,1	72,4	66,0	62,2
	DE	10,5	9,9	11,2	11,2	11,7
ρ (kg/m ³)	Mínimo	347	327	326	344	381
	Medio	426	435	427	430	443
	Máximo	575	602	550	567	496
	DE	45	59	51	48	30

f_m : tensión de rotura obtenida del ensayo de flexión. ρ : densidad corregida a un contenido de humedad de referencia del 12% conforme a la norma EN 384 (2010). DE: desviación estándar. n: cantidad de cuerpos de prueba.

La tendencia general decreciente de f_m al aumentar h se manifiesta más claramente en la Figura 1, la cual exhibe la relación entre f_m y h para los 820 cuerpos de prueba ensayados. Con el propósito de estimar la importancia de esta relación se llevó a cabo un análisis de regresión lineal simple, el cual puso en evidencia una correlación negativa altamente significativa ($p < 0,0005$) entre ambas variables, con un valor del coeficiente de correlación (R) igual a -0,53.

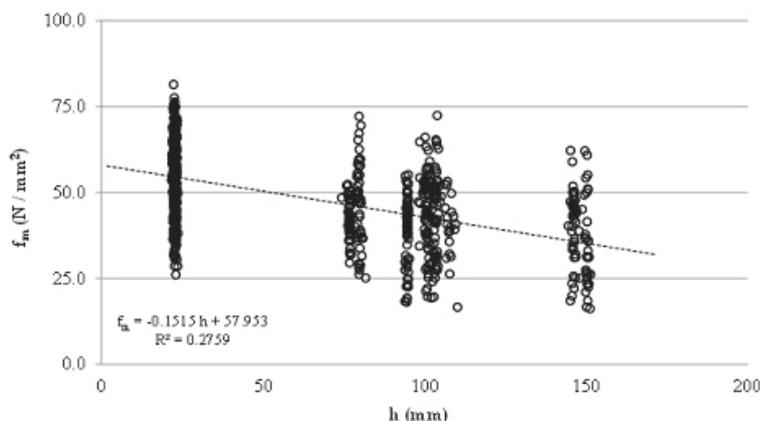


Figura 1. Relación entre la altura de la sección (h) y la tensión de rotura en flexión (f_m) para los 820 cuerpos de prueba ensayados.

Análisis de la efectividad del criterio europeo

Teniendo en cuenta que el material investigado debe clasificarse por resistencia para su uso estructural, en este estudio es necesario considerar cada grado contemplado en el método de clasificación provisto por la norma IRAM 9662-4 (2015). Debido a las diferencias existentes en el tamaño de las muestras, particularmente en la cantidad de piezas asignadas a cada grado, se decidió realizar el análisis sobre la base de los valores medios y no de los 5-percentiles. En la Tabla 3 se presentan los valores

medios de la tensión de rotura (f_{m-m}) en forma discriminada para las muestras y los grados estructurales. La inclusión del Residuo en esta tabla obedece a dos razones. Una responde al interés de investigar todas las calidades de la madera que es objeto del presente estudio. La otra se relaciona al hecho de que por razones económicas ese material es empleado en construcciones transitorias o de bajo costo.

La tabla provee también para cada caso el valor de la desviación estándar (DE) y la cantidad de cuerpos de prueba (n). Considerando que la Muestra $5_{50 \times 150}$ fue preparada con cuerpos de prueba exhibiendo una altura nominal coincidente con la de referencia (150 mm), y que su valor real promedio luego del cepillado fue 148 mm (Tabla 1), se decidió ignorar esa exigua diferencia de 2 mm y considerar los resultados de f_{m-m} correspondientes a esta muestra como valor de referencia para el análisis dentro de cada grado estructural ($f_{m-m,ref}$).

La observación de la Tabla 3 permite apreciar una disminución de f_{m-m} desde el Grado 1 hasta el Residuo dentro de cada muestra. Esa disminución, que es más atenuada entre el Grado 2 y el Residuo de la Muestra $1_{100 \times 25}$, y entre el Grado 1 y el Grado 2 de la Muestra $4_{50 \times 100}$, ratifica en general la eficiencia del método de clasificación aplicado. La cantidad de cuerpos de prueba (n) asignados a los grados superiores corrobora un excelente rendimiento del material en todas las muestras, en línea con reportes de estudios previos (Guillaumet *et al.* 2014a) y a la reducida presencia de defectos que lo distingue de otras especies cultivadas en el país (Fank *et al.* 2014b).

Tabla 3. Valores medios y desviación estándar de la tensión de rotura para las distintas muestras y grados estructurales.

Grado	Muestras						
			$1_{100 \times 25}$	$2_{50 \times 75}$	$3_{25 \times 100}$	$4_{50 \times 100}$	$5_{50 \times 150}$
Muestra completa	f_{m-m}	N/mm ²	54,8	44,6	41,3	42,4	$f_{m-m,ref} = 37,8$
	DE	N/mm ²	10,5	9,9	11,2	11,2	11,7
	n		437	96	114	97	76
Grado 1	f_{m-m}	N/mm ²	58,2	48,6	46,5	44,7	$f_{m-m,ref} = 41,2$
	DE	N/mm ²	10,0	9,3	9,1	9,1	11,9
	n		231	44	48	23	36
Grado 2	f_{m-m}	N/mm ²	51,6	43,6	39,2	43,5	$f_{m-m,ref} = 36,9$
	DE	N/mm ²	9,9	9,2	10,3	11,0	10,9
	n		174	37	55	55	30
Residuo ⁽¹⁾	f_{m-m}	N/mm ²	49,0	35,4	29,1	36,8	$f_{m-m,ref} = 28,5$
	DE	N/mm ²	8,4	6,5	11,5	12,3	8,0
	n		32	15	11	19	10

f_{m-m} : valor medio experimental de la tensión de rotura en flexión. $f_{m-m,ref}$: valor de referencia. DE: desviación estándar. n: cantidad de cuerpos de prueba. (1): no aceptado por la norma IRAM 9662-4 (2015) para la fabricación de madera laminada encolada estructural.

La Tabla 3 también muestra que el valor de f_{m-m} tiende a disminuir con el aumento de la altura de la sección en las muestras completas y en el Grado 1, y que esa tendencia decrece levemente en el Grado 2 y se atenúa más en el Residuo. Para apreciar el comportamiento del material ensayado en comparación con el admitido por la experiencia europea (EN 384 2010), en la Figura 2 se exhibe la variación del factor $k_h = (150/h)^{0,2}$ que formula el criterio europeo junto a los resultados experimentales para cada calidad de madera, expresados por las relaciones entre f_{m-m} y $f_{m-m,ref}$. Con el fin de evitar superposiciones que dificulten la evaluación de los datos desplegados, éstos se presentan separadamente para las muestras completas y para cada grado estructural.

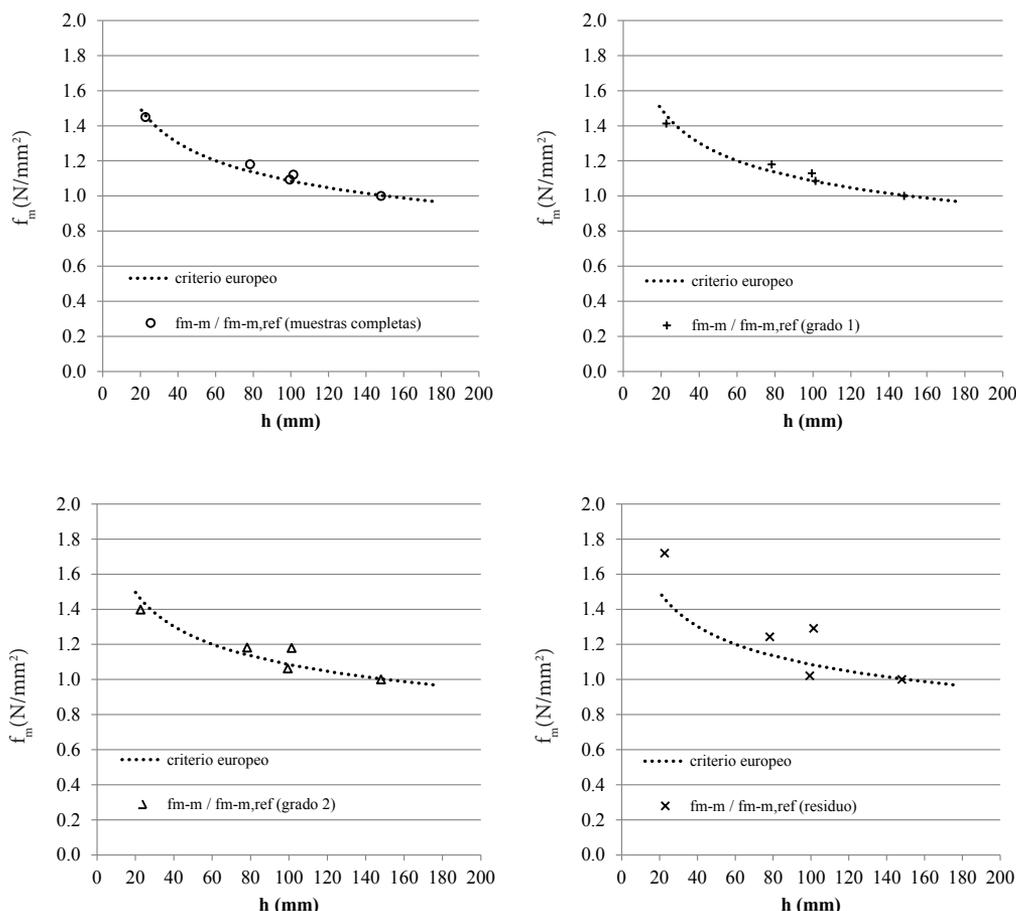


Figura 2. Resultados experimentales comparados con el criterio de la norma europea EN 384 (2010) para relacionar la tensión de rotura con la altura de la sección transversal.

Arriba, izquierda: resultados de $f_{m-m} / f_{m-m,ref}$ para las muestras completas (o). Arriba, derecha: resultados de $f_{m-m} / f_{m-m,ref}$ para el grado 1 (+). Abajo, izquierda: resultados de $f_{m-m} / f_{m-m,ref}$ para el grado 2 (Δ). Abajo, derecha: resultados de $f_{m-m} / f_{m-m,ref}$ para el Residuo (x). f_{m-m} : valor medio de la tensión de rotura. $f_{m-m,ref}$: valor medio de la tensión de rotura tomado como referencia.

La información desplegada en la Figura 2 confirma una elevada efectividad del criterio europeo para valorar la relación entre la altura de la sección y la tensión de rotura en el material investigado, con la excepción del Residuo. La máxima diferencia entre los resultados experimentales y los calculados según el criterio europeo es del orden del 4 % para las muestras completas y para el Grado 1, y ese porcentaje se mantiene en el Grado 2 con la única excepción de la Muestra 4_{50x100} (9 %), siendo este caso fácilmente identificable en la parte correspondiente de la Figura 2 para $h = 101,4$ mm (ver en la Tabla 1 los valores medios de h en cada muestra). Los resultados experimentales del Residuo se apartan en mayor medida del criterio europeo que los correspondientes a los grados superiores, especialmente en las muestras 1_{100x25} (18 %) y 4_{50x100} (19 %). Sin embargo, este particular comportamiento no pudo explicarse a través de un detallado estudio de los cuerpos de prueba asignados a este grupo, el cual, curiosamente, exhibe valores de la desviación estándar que son congruentes con los encontrados para los grados 1 y 2 (Tabla 3).

La correspondencia entre los resultados experimentales y los obtenidos aplicando el criterio europeo para los grados 1 y 2 es de destacar particularmente para la Muestra 1_{100x25}, integrada por tablas ensayadas de plano con una altura promedio (h) de 22,8 mm (Tabla 1). No obstante que la altura de referencia es 6,6 veces mayor que el valor de h en esta muestra -y consecuentemente $k_h = 1,46$ un análisis detallado de la información exhibida en la Figura 2 y en la Tabla 3 muestra que la diferencia entre k_h y el valor experimental alcanza 0,5 %, 3 % y 4 %, para la muestra completa, el Grado 1 y el 2, respectivamente.

A diferencia de lo encontrado por Barret *et al.* (1992) para madera de coníferas, y por Hermoso *et al.* (2002) y Hermoso Prieto *et al.* (2013) para el pino silvestre y el pino radiata, respectivamente, los resultados exhibidos en la Figura 2 están en línea con los publicados por Piter (2012) para el *E. grandis* y no muestran una relación general clara entre la calidad de la madera y la influencia de la altura de la sección sobre la resistencia a flexión. En este sentido se señala particularmente que: i) Las pequeñas diferencias encontradas entre el comportamiento de los grados 1 y 2 pueden considerarse propias de la variabilidad natural del material e ignorarse para propósitos prácticos vinculados al diseño estructural y, ii) Si bien el comportamiento de la madera de calidad inferior (Residuo) ajusta menos con el criterio europeo que la asignada a los grados 1 y 2, tampoco se advierte una estrecha relación (aunque fuese diferente de la adoptada por el criterio europeo) de ese comportamiento con la altura de la sección. La información exhibida en la Figura 2 y los valores de f_{m-m} presentados en la Tabla 3 para el Residuo de las muestras 3_{25x100} (29,1 N/mm²) y 4_{50x100} (36,8 N/mm²) prueban que f_{m-m} es un 26 % superior en esta última a pesar de que ambas muestras se integraron con piezas de igual altura nominal (100 mm).

Considerando que en el cálculo estructural la resistencia a flexión se expresa ajustada a la altura de referencia (INTI CIRSOC 2013), resulta de interés comparar los valores medios de ésta (f_{m150-m}) con los correspondientes valores experimentales de referencia ($f_{m-m,ref}$), los cuales se presentan en la Tabla 4 en forma discriminada para las muestras y los distintos grados. Con el propósito de analizar el comportamiento del material con la mayor precisión posible, principalmente en las muestras integradas por piezas de altura (h) pequeña, el ajuste a la altura de referencia se efectuó considerando el valor real del alto obtenido para cada muestra luego del cepillado (Tabla 1).

Tabla 4. Principales resultados de la tensión de rotura ajustada a la altura de referencia según el criterio europeo y de su relación con el valor experimental de referencia.

Grado			Muestras				
			1 _{100x25}	2 _{50x75}	3 _{25x100}	4 _{50x100}	5 _{50x150}
Muestra completa	f_{m150-m}	N/mm ²	37,6	39,2	38,1	39,2	$f_{m-m,ref} = 37,8$
	DE	N/mm ²	7,2	8,8	10,4	10,3	11,7
	$f_{m150-m} / f_{m-m,ref}$		0,99	1,04	1,01	1,04	1
	n		437	96	114	97	76
Grado 1	f_{m150-m}	N/mm ²	39,9	42,6	42,9	41,4	$f_{m-m,ref} = 41,2$
	DE	N/mm ²	6,9	8,3	8,5	8,4	11,9
	$f_{m150-m} / f_{m-m,ref}$		0,97	1,03	1,04	1,00	1
	n		231	44	48	23	36
Grado 2	f_{m150-m}	N/mm ²	35,4	38,3	36,1	40,2	$f_{m-m,ref} = 36,9$
	DE	N/mm ²	6,8	8,1	9,5	10,2	10,9
	$f_{m150-m} / f_{m-m,ref}$		0,96	1,04	0,98	1,09	1
	n		174	37	55	55	30
Residuo ⁽¹⁾	f_{m150-m}	N/mm ²	33,6	31,0	26,8	34,0	$f_{m-m,ref} = 28,5$
	DE	N/mm ²	5,8	5,7	10,9	11,4	8,0
	$f_{m150-m} / f_{m-m,ref}$		1,18	1,09	0,94	1,19	1
	n		32	15	11	19	10

f_{m150-m} : valor medio de la tensión de rotura ajustada a la altura de referencia de 150 mm según EN 384 (2010). $f_{m-m,ref}$: valor experimental de referencia. DE: desviación estándar. n: cantidad de cuerpos de prueba. (1): no aceptado por la norma IRAM 9662-4 (2015) para la fabricación de madera laminada encolada estructural.

Dado que el ajuste se realizó aplicando el criterio europeo, la concordancia entre éste y el comportamiento empírico (Figura 2) se pone de manifiesto en los valores cercanos a la unidad que adquieren las relaciones $f_{m150-m} / f_{m-m,ref}$ fundamentalmente en los grados superiores. Estos valores, que también se incluyen en la Tabla 4, oscilan entre 0,99 y 1,04 en las muestras completas, entre 0,97 y 1,04 en el Grado 1, entre 0,96 y 1,09 en el Grado 2 y entre 0,94 y 1,19 en el Residuo. Si bien en el último caso se manifiesta una menor correspondencia entre el modelo de ajuste y el comportamiento experimental, las diferencias entre los resultados no alcanzaron el límite de 20 % adoptado por las normas europeas (EN 384 2010) y argentinas (IRAM 9664 2013) para evitar una excesiva variabilidad entre muestras de madera estructural.

Estos resultados evidencian que la aplicación del factor k_h fue efectiva para reducir significativamente la influencia de la altura de la sección sobre la tensión de rotura en el conjunto del material y en los dos grados superiores, los cuales representan una proporción muy importante del material habida cuenta de su excelente rendimiento (Tabla 3). Por medio de dos análisis estadísticos se confirmó esa efectividad para las muestras completas: i) un análisis de varianza (ANOVA) probó que no existen diferencias significativas entre los valores de f_{m150-m} en las muestras completas a un nivel del 5 % ($p = 0,353$); ii) un análisis de regresión simple entre h y la resistencia ajustada a la altura de referencia ($f_{m150} = f_m / k_h$) para los 820 cuerpos de prueba ensayados confirmó una correlación no significativa ($p = 0,14$) y extremadamente débil entre ambas variables ($R = 0,038$).

Evaluación de alternativas al criterio europeo

Sobre la base del programa experimental desarrollado en este estudio fue posible evaluar alternativas orientadas a optimizar el criterio europeo, si bien su efectividad para propósitos prácticos vinculados al diseño estructural fue demostrada en el apartado anterior. Las alternativas se orientaron a: i) confirmar la inexistencia de una relación entre el ancho del cuerpo de prueba y la tensión de rotura y, ii) evaluar la conveniencia de modificar la formulación del factor K_h .

La evaluación de la primera alternativa se llevó a cabo sobre los resultados obtenidos con las muestras $3_{25 \times 100}$ y $4_{50 \times 100}$ (Tabla 2), sacando provecho de que el ancho de la segunda (50 mm) es el doble del adoptado para la primera (25 mm) pero ambas exhiben la misma altura nominal (100 mm). En consecuencia, la altura puede considerarse como un factor fijo a pesar de las pequeñas variaciones debidas al cepillado de los cuerpos de prueba. Se realizaron dos pruebas estadísticas: i) El test de Student (t) confirmó que no puede rechazarse la hipótesis de igualdad entre los valores medios de f_m en las muestras $3_{25 \times 100}$ (41,3 N/mm²) y $4_{50 \times 100}$ (42,4 N/mm²) a un nivel de significación del 5 % ($p = 0,47$). El relativamente elevado valor de la probabilidad asociada (p) es congruente con la pequeña diferencia entre los valores medios y con la existencia de la misma desviación estándar en ambas muestras (11,2 N/mm²); ii) un análisis de regresión simple entre el ancho de la sección y f_m para los 211 cuerpos de prueba incluidos en las dos muestras mencionadas confirmó una correlación no significativa ($p = 0,379$) y extremadamente débil entre ambas variables ($R = 0,061$). Estos resultados confirman que puede ignorarse la influencia del ancho de la sección sobre la resistencia en el material investigado. Hermoso *et al.* (2002) y Fernández Golfín *et al.* (2002) publican resultados no concordantes con los encontrados en esta investigación. Los primeros reportan una disminución de la resistencia al aumentar el ancho de la sección en el pino silvestre, la cual es sólo significativa en el material de menor calidad. Los segundos, contrariamente, reportan un aumento significativo de la resistencia con el ancho de la sección, tanto para el pino silvestre como para el pino laricio.

La evaluación de la segunda alternativa se llevó a cabo separadamente con todos los cuerpos de prueba (820), con los asignados al Grado 1 (382), al Grado 2 (351) y al Residuo (87). Para este fin se descartó una influencia del ancho de la sección -considerando los resultados presentados en el párrafo anterior-, y se mantuvo invariable la altura de referencia (150 mm) por resultar apropiada a las dimensiones usuales del material investigado. A través de un análisis estadístico se determinó el exponente que en la formulación del factor k_h expresa mejor la relación entre la altura de la sección y la tensión de rotura encontrada experimentalmente (Figura 2). Los resultados mostraron que sustituyendo el exponente 0,2 por los valores 0,1883; 0,17; 0,1615 y 0,2585 se optimiza la representación del comportamiento empírico en todo el material, en el Grado 1, el Grado 2 y el Residuo, respectivamente.

No obstante, el ajuste de f_m a la altura de referencia aplicando el factor con los exponentes señalados arroja valores medios similares a los obtenidos con $k_h = (150/h)^{0.2}$, con diferencias del orden de 1 % para el total del material, 4 % para los grados 1 y 2, y 5 % para el Residuo. Estas diferencias relativamente exiguas reafirman la conveniencia de mantener la expresión actual de k_h , la que a su vez presenta la ventaja de ser aplicable a todas las especies y calidades de madera, minimizando en consecuencia la probabilidad de cometer errores en su utilización. En la misma línea, Hermoso *et al.* (2002) informan que la influencia de la altura sobre la resistencia a flexión en madera de pino silvestre está adecuadamente expresada por el factor $k_h = (150/h)^{0.2}$.

CONCLUSIONES

Los resultados experimentales confirmaron que el aumento de la altura de la sección transversal fue acompañado de una tendencia decreciente en la resistencia a flexión, pero no pusieron de manifiesto una vinculación de esa relación con la calidad de la madera. Por medio de un estudio estadístico se comprobó que puede ignorarse la influencia del ancho de la sección sobre la resistencia.

El análisis ratificó -para propósitos prácticos vinculados al diseño estructural- la efectividad del criterio europeo para valorar la relación entre la altura de la sección y la tensión de rotura en el material investigado. La máxima diferencia entre los resultados experimentales y los ajustados a la condición de referencia según este criterio alcanzó 4 % para las muestras completas, el Grado 1, y el Grado 2, con la excepción en este último caso de una muestra que exhibió una diferencia de 9 %. Para el material asignado al Residuo el criterio mostró una efectividad menor, aunque las diferencias respecto de los resultados experimentales no alcanzaron el límite adoptado por las normas europeas y argentinas (20 %) para evitar una excesiva variabilidad entre muestras.

A través de un análisis específico no se encontraron alternativas que justifiquen la modificación del criterio europeo formulado a través del factor $k_h = (150/h)^{0.2}$, el cual fue adoptado recientemente por la normativa de Argentina.

BIBLIOGRAFÍA

Achinelli, F.G.; Denegri, G.; Marlats, R. 2004. Evolución y perspectivas del cultivo de Salicáceas en la pampa húmeda argentina. *SAGPyA Forestal* 32: 14-23.

Barrett, J.D.; Lam, F.; Lau, W. 1992. Size effects in visually graded softwood structural lumber. International Council for Building Research Studies and Documentation, Working Commission W18 - Timber Structures, CIB-W18, paper 25-6-5, Ahus, Sweden.

Borodowski, E.D. 2006. Álamos y sauces en el delta del Paraná: situación del sector y silvicultura. Disertación. Actas de las Jornadas de Salicáceas 2006:61-70.

Cortizo, S. 2005. Mejores árboles para más forestadores. Subprograma álamos en el delta del Paraná de la SAGPyA, Capítulo III, pág. 137 a 160.

Denzler, J.K. & Glos, P. 2008. Size effects in bending. International Council for Research and Innovation in Building and Construction, Working Commission W18 - Timber Structures, CIB-W18, paper 41-6-4, St. Andrews, Canada.

EN 384. 2010. Structural timber - Determination of characteristic values of mechanical properties and density. European Committee for Standardization, Brussels.

EN 408. 2010. Timber structures - Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties. European Committee for Standardization, Brussels.

Fank, P.; Stefani, P.; Piter, J.C. 2014a. Efecto de la altura en la resistencia a flexión en piezas de pino resinoso del noreste de Argentina. XXXVI Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, trabajo 263, Montevideo, Uruguay.

Fank, P.; Stefani, P.; Piter, J.C. 2014b. Resistencia y rigidez de tablas destinadas a la fabricación de madera laminada encolada estructural. Análisis comparativo entre el pino resinoso (*Pinus taeda/elliottii*) y el álamo (*Populus deltoides* 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67'). IV Congreso Internacional de las Salicáceas en Argentina. La Plata, Argentina.

Fernández Golfín, J.I.; Hermoso, E.; Diez, M.R. 2002. Análisis del efecto del volumen sobre la resistencia característica a flexión de la madera de los pinos silvestre y laricio de procedencia española. *Materiales de Construcción* 52(268): 43-55.

Guillaumet, A.; Acuña Rello, L.; Piter, J.C. 2014a. Evaluación del rendimiento de las tablas de *Populus deltoides* 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67' para la fabricación de vigas laminadas encoladas. IV Congreso Internacional de las Salicáceas en Argentina. La Plata, Argentina.

Guillaumet, A.A.; Filippetti, M.C.; Acuña Rello, L.; Piter, J.C. 2014b. Utilización de la madera de álamo en elementos estructurales. XXXVI Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural. Montevideo, Uruguay.

Hermoso, E.; Fernández Golfín, J.I.; Diez, M.R. 2002. Análisis del factor de altura k_h en la madera aserrada estructural de pino silvestre. *Invest Agr Sist Recur For* 11 (2): 441-448.

Hermoso Prieto, E.; Díaz Barra, M.R.; Fernández Golfín, J.I.; Iñiguez González, G. 2013. Efecto del tamaño de la sección y la médula sobre la resistencia y rigidez de la madera aserrada estructural de pino radiata. 6º Congreso Forestal Español. Vitoria Gasteiz. España.

INTI CIRSOC. 2013. Reglamento Argentino de Estructuras de Madera. Disposiciones generales y requisitos para el diseño y la construcción de estructuras de madera en edificaciones. Buenos Aires, Argentina, [disponible en] <<http://www.inti.gov.ar/cirsoc/pdf/601/CIRSOC601-completo.pdf>> [11/01/2016]

INTI CIRSOC. 2015. Suplementos del Reglamento CIRSOC 601-2013-. Actualización de octubre 2015. Buenos Aires, Argentina, [disponible en] <<http://www.inti.gov.ar/cirsoc/pdf/601/sup-act-oct-2015.pdf>> [11/01/2016]

IRAM 9662-4. 2015. Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por resistencia. Parte 4: Tablas de álamo 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67' (*Populus deltoides*). Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires, Argentina.

IRAM 9664. 2013. Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires, Argentina.

ISO 3130. 1975. International Organization for Standardization. Wood - Determination of moisture content for physical and mechanical tests.

ISO 3131. 1975. International Organization for Standardization. Wood - Determination of density for physical and mechanical tests.

NCh 1198. 2007. Madera - Construcciones en madera - Cálculo. Instituto Nacional de Normalización INN-Chile, Santiago.

NDS. 2012. National design specification for wood construction. American Forest & Paper Association Inc.

Newlin, J.A.; Trayer, G.W. 1924. Form factors of beams subjected to transverse loading only. The influence of the form of a wooden beam on its stiffness and strength. Report No.181, Forest Products Laboratory, U.S. Department of Agriculture, p. 375-393. Reprinted as Report 1310, October 1941.

Piter, J.C. 2012. Size effect on bending strength in sawn timber of fast-growing Argentinean *Eucalyptus grandis*. Analysis according to the criterion of European standards. *European Journal of Wood and Wood Products* 70(1-3): 17-24.

Ramos, R.; Gómez, R.; Torrán, E.; Piter, J.C. 2014a. Propiedades físico-mecánicas de la madera laminada encolada estructural de álamo (*Populus deltoides* 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67'). Análisis conforme al criterio adoptado por la normativa europea. IV Congreso Internacional de las Salicáceas en Argentina. La Plata, Argentina.

Ramos, R.; Sosa Zitto, M.A.; Gómez, R., Torrán, E., Piter, J.C. 2014b. Madera laminada encolada estructural de álamo. Determinación empírica de su comportamiento mecánico. XXXVI Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural. Montevideo, Uruguay.

Rouger, F. 1995. Volume and stress distribution effects. In: Timber Engineering STEP 1, Basis of design, material properties, structural components and joints, B1/1-B1/8. Centrum Hout, The Netherlands.

Rouger, F.; Barrett, J.D. 1995. Size effects in timber. In: Informationsdienst Holz, STEP 3: 3/1-3/24. Fachverlang Holz. Düsseldorf, Deutschland.

UNE-EN 1310. 1997. Madera aserrada y madera en rollo. Método de medida de singularidades. Agencia Española de Normalización y Certificación. Madrid, España.

Weibull, W. 1939. The phenomenon of rupture in solids. In: Royal Swedish Institute for Engineering Research, Proceeding N°153. Stockholm, Sweden.