

INFLUENCIA DE LAS DIMENSIONES DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL SOBRE LA RESISTENCIA A FLEXIÓN EN MADERA ASERRADA DE *Populus deltoides* CULTIVADOS 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(*)}

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

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

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

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

Recibido: 25.01.2016

Aceptado: 03.07.2016

Posted online: 04.07.2016.

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.

32

33

ABSTRACT

34

35

36

37

38

39

40

41

42

43

44

INTRODUCCIÓN

45

46

47

48

49

50

51

52

53

54

55

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* ‘Australian 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

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 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

56 rendimiento técnico y económico (Guillaumet *et al.* 2014a, b; Ramos *et al.* 2014a, b). También se han
57 publicado resultados que comparan el comportamiento estructural de la madera de estos clones con el
58 del pino resinoso (Fank *et al.* 2014b), siendo esta última una especie de referencia por su importancia
59 en el país.

60 En el plano de la normalización, la reciente norma IRAM 9662-4 (2015) adopta un método visual
61 de clasificación por resistencia y provee los valores característicos de las principales propiedades para
62 dos grados estructurales. La inexistencia de diferencias significativas en el comportamiento físico-
63 mecánico de la madera obtenida de ambos clones y la dificultad práctica de distinguirlas en el mercado,
64 motivaron que la norma mencionada aplique tanto el método de clasificación como los valores
65 característicos de las propiedades en forma indistinta al material obtenido de los dos clones ya
66 mencionados. A partir de los valores característicos de las propiedades provistos por la norma IRAM
67 9662-4 (2015) se derivaron los valores de diseño de referencia para cada grado estructural según los
68 lineamientos del Reglamento Argentino de Estructuras de Madera (INTI CIRSOC 2013). Éstos fueron
69 incorporados a los suplementos del reglamento para ser utilizados por los proyectistas estructurales
70 (INTI CIRSOC 2015).

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

77 A nivel internacional se conocen numerosos estudios referidos a la influencia del tamaño de la
78 sección transversal sobre la tensión de rotura en flexión, motivados inicialmente por la evidencia
79 empírica que ha mostrado –en maderas de similar calidad- un incremento de la resistencia para una

80 disminución de la sección. Según la proposición de Newlin y Trayer (1924), las fibras sometidas a
81 compresión son propensas a fallar por la inestabilidad de su equilibrio y las menos solicitadas por su
82 cercanía al eje neutro contribuyen significativamente con la estabilidad de las restantes en las vigas de
83 menor altura, lo que explica el incremento de la resistencia a flexión en esos casos.

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

97 En el plano normativo internacional, y si bien con disímiles criterios influenciados por la
98 diversidad de tradiciones y por la multiplicidad de combinaciones especie / zona de cultivo, las normas
99 y reglas de diseño de diferentes países consideran el efecto del tamaño de la sección sobre la resistencia
100 a flexión. La determinación de ese efecto tiene en cuenta en algunos casos la especie -o grupo de
101 especies-, como el criterio adoptado en Chile (NCh 1198 2007), y en otros casos considera el grado
102 estructural, como el adoptado en Estados Unidos de Norteamérica (NDS 2012).

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

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

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

124

125

126

MATERIALES Y MÉTODOS

127
128
129
130
131
132
133
134
135
136
137
138
139
140
141
142
143
144
145
146
147
148
149
150

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.

151 **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 | | | | |

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

153 Los parámetros visuales fueron registrados conforme al criterio de las normas UNE-EN 1310
 154 (1997) e IRAM 9662-4 (2015). El material fue clasificado visualmente por resistencia según el método
 155 adoptado por IRAM 9662-4 (2015), designándose como Residuo todo aquel que no cumplió los
 156 requisitos establecidos para ser asignado a los dos grados (Grado 1 y Grado 2) previstos por la norma.

157 Los ensayos se realizaron de acuerdo a las prescripciones de la norma EN 408 (2010). Las cargas
 158 se aplicaron en los tercios de la separación entre apoyos (siendo ésta igual a 18 veces la altura (h) del
 159 cuerpo de prueba) por medio de una máquina de ensayos universales con precisión igual a 1 % y
 160 capacidad de desplazar el cabezal con velocidad constante. En los puntos de apoyo y de aplicación de
 161 la carga se colocaron placas de acero de ancho igual a la mitad de la altura de la viga, con el objeto de
 162 reducir el aplastamiento localizado de la madera. Para impedir el pandeo lateral, en los cuerpos de
 163 prueba de las muestras 3_{25x100} y 5_{50x150} se ubicaron dispositivos especiales capaces de proporcionar
 164 arriostamiento lateral sin obstaculizar las deformaciones verticales. La tensión de rotura en flexión (f_m)
 165 se determinó con la expresión convencional provista por la norma EN 408 (2010). El valor de f_m
 166 ajustado a una altura de referencia de 150 mm (f_{m150}) se llevó a cabo según el criterio de la norma EN
 167 384 (2010) como $f_{m150} = f_m / k_h$, siendo $k_h = (150 / h)^{0,2}$ con la altura (h) expresada en mm.

168 El contenido de humedad y la densidad se determinaron según las normas ISO 3130 (1975) e ISO
169 3131 (1975), respectivamente, luego de finalizado el ensayo. Para este fin se empleó un trozo de
170 sección obtenido en las proximidades de la zona de rotura, abarcando toda la sección transversal, y
171 libre de defectos.

172

173

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

174 La Tabla 2 exhibe, en forma discriminada para las 5 muestras, los principales resultados
175 obtenidos experimentalmente para la tensión de rotura en flexión (f_m). La tabla presenta también los
176 resultados de la densidad (ρ) ajustada a un contenido de humedad de referencia del 12 % conforme a la
177 norma EN 384 (2010), los cuales son congruentes con los adoptados por la norma IRAM 9662-4
178 (2015) y con los publicados por Fank et al. (2014b) a partir de un trabajo empírico llevado a cabo sobre
179 307 cuerpos de prueba del mismo material. El contenido de humedad en los 820 cuerpos de prueba
180 ensayados alcanzó un valor medio igual a 12,2 % con una desviación estándar de 1,6 %.

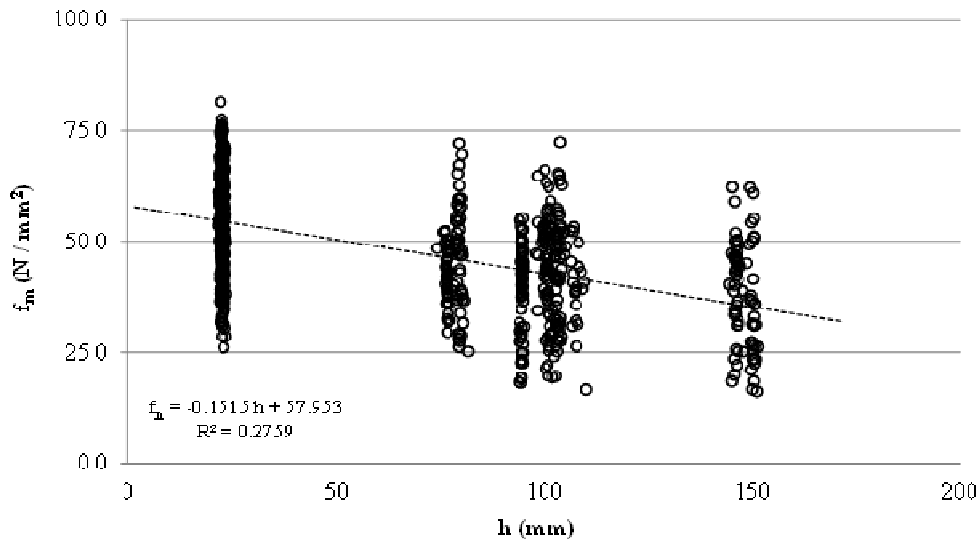
181 Se observa en esta tabla una tendencia decreciente de los valores medios de f_m al aumentar la
182 altura (h) de los cuerpos de prueba tanto en las 3 muestras con cuerpos de igual ancho ($2_{50 \times 75}$, $4_{50 \times 100}$ y
183 $5_{50 \times 150}$) como en la que exhibe los de mayor ancho ($1_{100 \times 25}$) y en aquella con el menor ($3_{25 \times 100}$), lo cual
184 revela la existencia de una relación entre f_m y h . Por otra parte, es de destacar que los valores medios de
185 f_m en las muestras $3_{25 \times 100}$ ($41,3 \text{ N/mm}^2$) y $4_{50 \times 100}$ ($42,4 \text{ N/mm}^2$) presentan una diferencia exigua (menor
186 a 3 %) si se tiene en cuenta la variabilidad natural del material, y las dos exhiben la misma desviación
187 estándar ($11,2 \text{ N/mm}^2$). Considerando que $3_{25 \times 100}$ y $4_{50 \times 100}$ contienen cuerpos de prueba con la misma
188 altura nominal (100 mm) pero el ancho de los mismos en la última (50 mm) es el doble que en la
189 primera (25 mm), estos resultados sugieren la inexistencia de una relación entre f_m y el ancho de la
190 sección. La dispersión de resultados de f_m fue similar en las 5 muestras, con valores de la desviación
191 estándar variando entre $9,9 \text{ N/mm}^2$ y $11,7 \text{ N/mm}^2$.

192 **Tabla 2.** Principales resultados obtenidos para la tensión de rotura (f_m) y la densidad (ρ).
 193

| | | Muestras | | | | |
|--------------------------------|--------|---------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | | 1 _{100x25} | 2 _{50x75} | 3 _{25x100} | 4 _{50x100} | 5 _{50x150} |
| | | n = 437 | n = 96 | n = 114 | n = 97 | 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 |

194 f_m : tensión de rotura obtenida del ensayo de flexión. ρ : densidad corregida a un contenido de humedad de referencia del
 195 12% conforme a la norma EN 384 (2010). DE: desviación estándar. n: cantidad de cuerpos de prueba.

196 La tendencia general decreciente de f_m al aumentar h se manifiesta más claramente en la Figura
 197 1, la cual exhibe la relación entre f_m y h para los 820 cuerpos de prueba ensayados. Con el propósito de
 198 estimar la importancia de esta relación se llevó a cabo un análisis de regresión lineal simple, el cual
 199 puso en evidencia una correlación negativa altamente significativa ($p < 0,0005$) entre ambas variables,
 200 con un valor del coeficiente de correlación (R) igual a -0,53.



201 **Figura 1.** Relación entre la altura de la sección (h) y la tensión de rotura en flexión (f_m) para los 820
 202 cuerpos de prueba ensayados.
 203
 204

206 **Análisis de la efectividad del criterio europeo**

207 Teniendo en cuenta que el material investigado debe clasificarse por resistencia para su uso
208 estructural, en este estudio es necesario considerar cada grado contemplado en el método de
209 clasificación provisto por la norma IRAM 9662-4 (2015). Debido a las diferencias existentes en el
210 tamaño de las muestras, particularmente en la cantidad de piezas asignadas a cada grado, se decidió
211 realizar el análisis sobre la base de los valores medios y no de los 5-percentiles. En la Tabla 3 se
212 presentan los valores medios de la tensión de rotura (f_{m-m}) en forma discriminada para las muestras y
213 los grados estructurales. La inclusión del Residuo en esta tabla obedece a dos razones. Una responde al
214 interés de investigar todas las calidades de la madera que es objeto del presente estudio. La otra se
215 relaciona al hecho de que por razones económicas ese material es empleado en construcciones
216 transitorias o de bajo costo.

217 La tabla provee también para cada caso el valor de la desviación estándar (DE) y la cantidad de
218 cuerpos de prueba (n). Considerando que la Muestra 5_{50x150} fue preparada con cuerpos de prueba
219 exhibiendo una altura nominal coincidente con la de referencia (150 mm), y que su valor real promedio
220 luego del cepillado fue 148 mm (ver la Tabla 1), se decidió ignorar esa exigua diferencia de 2 mm y
221 considerar los resultados de f_{m-m} correspondientes a esta muestra como valor de referencia para el
222 análisis dentro de cada grado estructural ($f_{m-m,ref}$).

223 La observación de la Tabla 3 permite apreciar una disminución de f_{m-m} desde el Grado 1 hasta el
224 Residuo dentro de cada muestra. Esa disminución, que es más atenuada entre el Grado 2 y el Residuo
225 de la Muestra 1_{100x25}, y entre el Grado 1 y el Grado 2 de la Muestra 4_{50x100}, ratifica en general la
226 eficiencia del método de clasificación aplicado. La cantidad de cuerpos de prueba (n) asignados a los
227 grados superiores corrobora un excelente rendimiento del material en todas las muestras, en línea con
228 reportes de estudios previos (Guillaumet et al. 2014a) y a la reducida presencia de defectos que lo
229 distingue de otras especies cultivadas en el país (Fank et al. 2014b).

230 **Tabla 3.** Valores medios y desviación estándar de la tensión de rotura para las distintas muestras y
 231 grados estructurales.
 232

| Grado | Muestras | | | | | | |
|------------------------|-----------|-------------------|---------------------|--------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
| | | | 1 _{100x25} | 2 _{50x75} | 3 _{25x100} | 4 _{50x100} | 5 _{50x150} |
| 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 |

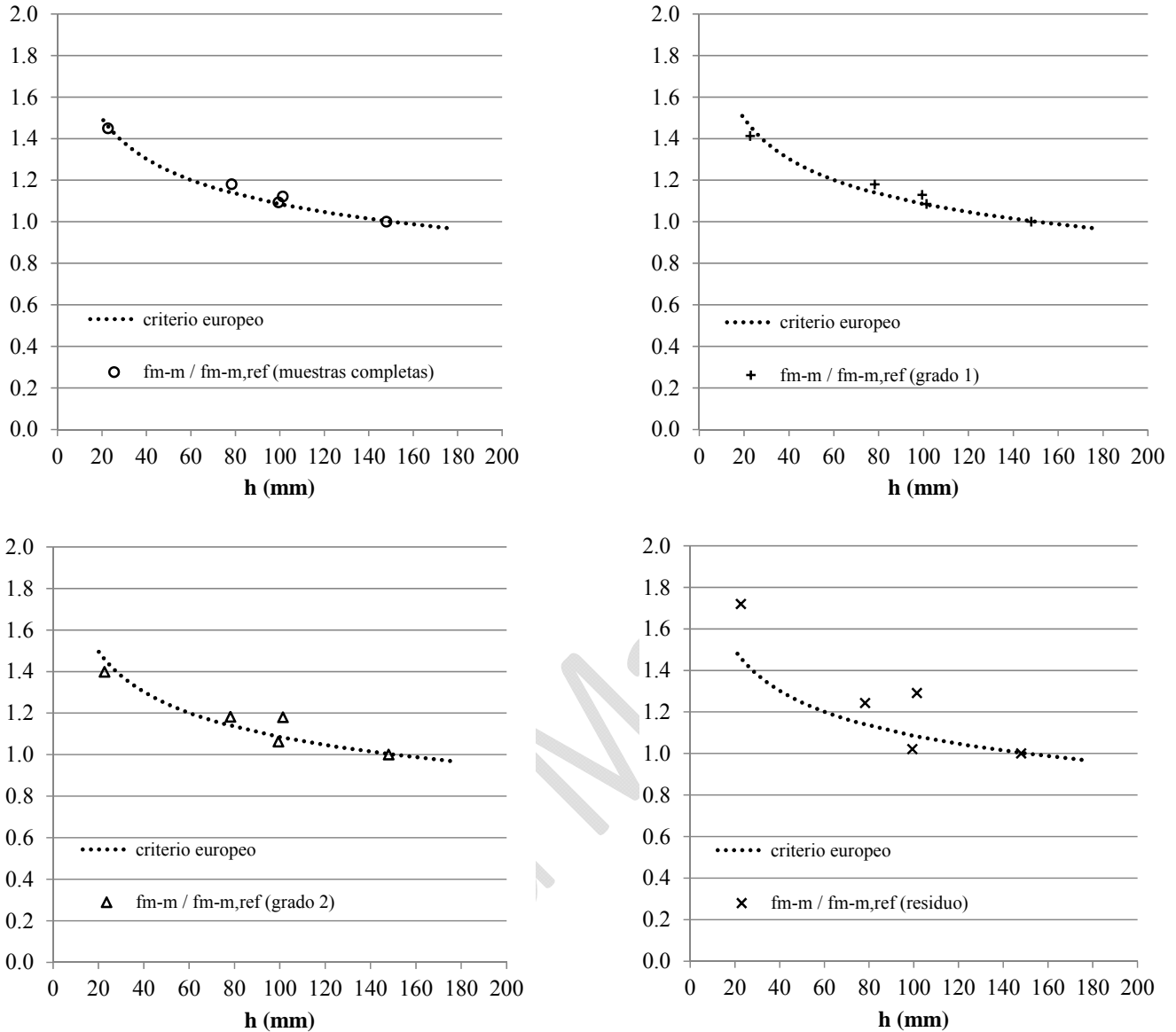
233 f_{m-m} : valor medio experimental de la tensión de rotura en flexión. $f_{m-m,ref}$: valor de referencia. DE: desviación estándar. n:
 234 cantidad de cuerpos de prueba. (1): no aceptado por la norma IRAM 9662-4 (2015) para la fabricación de madera laminada
 235 encolada estructural.
 236

237

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

246

247



248

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

251 Arriba, izquierda: resultados de $f_{m-m} / f_{m-m,ref}$ para las muestras completas (o). Arriba, derecha: resultados de $f_{m-m} / f_{m-m,ref}$
252 para el grado 1 (+). Abajo, izquierda: resultados de $f_{m-m} / f_{m-m,ref}$ para el grado 2 (Δ). Abajo, derecha: resultados de $f_{m-m} / f_{m-m,ref}$
253 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
254 referencia.
255

256 La información desplegada en la Figura 2 confirma una elevada efectividad del criterio europeo
257 para valorar la relación entre la altura de la sección y la tensión de rotura en el material investigado,
258 con la excepción del Residuo. La máxima diferencia entre los resultados experimentales y los

259 calculados según el criterio europeo es del orden del 4 % para las muestras completas y para el Grado
260 1, y ese porcentaje se mantiene en el Grado 2 con la única excepción de la Muestra $4_{50 \times 100}$ (9 %), siendo
261 este caso fácilmente identificable en la parte correspondiente de la Figura 2 para $h = 101,4$ mm (ver en
262 la Tabla 1 los valores medios de h en cada muestra). Los resultados experimentales del Residuo se
263 apartan en mayor medida del criterio europeo que los correspondientes a los grados superiores,
264 especialmente en las muestras $1_{100 \times 25}$ (18 %) y $4_{50 \times 100}$ (19 %). Sin embargo, este particular
265 comportamiento no pudo explicarse a través de un detallado estudio de los cuerpos de prueba asignados
266 a este grupo, el cual, curiosamente, exhibe valores de la desviación estándar que son congruentes con
267 los encontrados para los grados 1 y 2 (Tabla 3).

268 La correspondencia entre los resultados experimentales y los obtenidos aplicando el criterio
269 europeo para los grados 1 y 2 es de destacar particularmente para la Muestra $1_{100 \times 25}$, integrada por
270 tablas ensayadas de plano con una altura promedio (h) de 22,8 mm (Tabla 1). No obstante que la altura
271 de referencia es 6,6 veces mayor que el valor de h en esta muestra -y consecuentemente $k_h = 1,46-$, un
272 análisis detallado de la información exhibida en la Figura 2 y en la Tabla 3 muestra que la diferencia
273 entre k_h y el valor experimental alcanza 0,5 %, 3 % y 4 %, para la muestra completa, el Grado 1 y el 2,
274 respectivamente.

275 A diferencia de lo encontrado por Barret *et al.* (1992) para madera de coníferas, y por Hermoso *et*
276 *al.* (2002) y Hermoso Prieto *et al.* (2013) para el pino silvestre y el pino radiata, respectivamente, los
277 resultados exhibidos en la Figura 2 están en línea con los publicados por Piter (2012) para el *E. grandis*
278 y no muestran una relación general clara entre la calidad de la madera y la influencia de la altura de la
279 sección sobre la resistencia a flexión. En este sentido se señala particularmente que: i) Las pequeñas
280 diferencias encontradas entre el comportamiento de los grados 1 y 2 pueden considerarse propias de la
281 variabilidad natural del material e ignorarse para propósitos prácticos vinculados al diseño estructural
282 y, ii) Si bien el comportamiento de la madera de calidad inferior (Residuo) ajusta menos con el criterio

283 europeo que la asignada a los grados 1 y 2, tampoco se advierte una estrecha relación (aunque fuese
284 diferente de la adoptada por el criterio europeo) de ese comportamiento con la altura de la sección. La
285 información exhibida en la Figura 2 y los valores de f_{m-m} presentados en la Tabla 3 para el Residuo de
286 las muestras $3_{25 \times 100}$ ($29,1 \text{ N/mm}^2$) y $4_{50 \times 100}$ ($36,8 \text{ N/mm}^2$) prueban que f_{m-m} es un 26 % superior en esta
287 última a pesar de que ambas muestras se integraron con piezas de igual altura nominal (100 mm).

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

295

296

297

298

299

300

301

302

303

304

305

306 **Tabla 4.** Principales resultados de la tensión de rotura ajustada a la altura de referencia según el criterio
 307 europeo y de su relación con el valor experimental de referencia.
 308

| 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 |

309 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
 310 experimental de referencia. DE: desviación estándar. n: cantidad de cuerpos de prueba. (1): no aceptado por la norma IRAM
 311 9662-4 (2015) para la fabricación de madera laminada encolada estructural.
 312

313 Dado que el ajuste se realizó aplicando el criterio europeo, la concordancia entre éste y el
 314 comportamiento empírico (Figura 2) se pone de manifiesto en los valores cercanos a la unidad que
 315 adquieren las relaciones $f_{m150-m} / f_{m-m,ref}$, fundamentalmente en los grados superiores. Estos valores, que
 316 también se incluyen en la Tabla 4, oscilan entre 0,99 y 1,04 en las muestras completas, entre 0,97 y
 317 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
 318 último caso se manifiesta una menor correspondencia entre el modelo de ajuste y el comportamiento
 319 experimental, las diferencias entre los resultados no alcanzaron el límite de 20 % adoptado por las
 320 normas europeas (EN 384 2010) y argentinas (IRAM 9664 2013) para evitar una excesiva variabilidad
 321 entre muestras de madera estructural.

322 Estos resultados evidencian que la aplicación del factor k_h fue efectiva para reducir
 323 significativamente la influencia de la altura de la sección sobre la tensión de rotura en el conjunto del

324 material y en los dos grados superiores, los cuales representan una proporción muy importante del
325 material habida cuenta de su excelente rendimiento (Tabla 3). Por medio de dos análisis estadísticos se
326 confirmó esa efectividad para las muestras completas: i) un análisis de varianza (ANOVA) probó que
327 no existen diferencias significativas entre los valores de f_{m150-m} en las muestras completas a un nivel del
328 5 % ($p = 0,353$); ii) un análisis de regresión simple entre h y la resistencia ajustada a la altura de
329 referencia ($f_{m150} = f_m / k_h$) para los 820 cuerpos de prueba ensayados confirmó una correlación no
330 significativa ($p = 0,14$) y extremadamente débil entre ambas variables ($R = 0,038$).

331

332 **Evaluación de alternativas al criterio europeo**

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

338 La evaluación de la primera alternativa se llevó a cabo sobre los resultados obtenidos con las
339 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
340 doble del adoptado para la primera (25 mm) pero ambas exhiben la misma altura nominal (100 mm).
341 En consecuencia, la altura puede considerarse como un factor fijo a pesar de las pequeñas variaciones
342 debidas al cepillado de los cuerpos de prueba. Se realizaron dos pruebas estadísticas: i) El test de
343 Student (t) confirmó que no puede rechazarse la hipótesis de igualdad entre los valores medios de f_m en
344 las muestras $3_{25 \times 100}$ ($41,3 \text{ N/mm}^2$) y $4_{50 \times 100}$ ($42,4 \text{ N/mm}^2$) a un nivel de significación del 5 % ($p = 0,47$).
345 El relativamente elevado valor de la probabilidad asociada (p) es congruente con la pequeña diferencia
346 entre los valores medios y con la existencia de la misma desviación estándar en ambas muestras ($11,2$
347 N/mm^2); ii) un análisis de regresión simple entre el ancho de la sección y f_m para los 211 cuerpos de

348 prueba incluidos en las dos muestras mencionadas confirmó una correlación no significativa ($p =$
349 $0,379$) y extremadamente débil entre ambas variables ($R = 0,061$). Estos resultados confirman que
350 puede ignorarse la influencia del ancho de la sección sobre la resistencia en el material investigado.
351 Hermoso *et al.* (2002) y Fernández Golfín *et al.* (2002) publican resultados no concordantes con los
352 encontrados en esta investigación. Los primeros reportan una disminución de la resistencia al aumentar
353 el ancho de la sección en el pino silvestre, la cual es sólo significativa en el material de menor calidad.
354 Los segundos, contrariamente, reportan un aumento significativo de la resistencia con el ancho de la
355 sección, tanto para el pino silvestre como para el pino laricio.

356 La evaluación de la segunda alternativa se llevó a cabo separadamente con todos los cuerpos de
357 prueba (820), con los asignados al Grado 1 (382), al Grado 2 (351) y al Residuo (87). Para este fin se
358 descartó una influencia del ancho de la sección -considerando los resultados presentados en el párrafo
359 anterior-, y se mantuvo invariable la altura de referencia (150 mm) por resultar apropiada a las
360 dimensiones usuales del material investigado. A través de un análisis estadístico se determinó el
361 exponente que en la formulación del factor k_h expresa mejor la relación entre la altura de la sección y la
362 tensión de rotura encontrada experimentalmente (Figura 2). Los resultados mostraron que sustituyendo
363 el exponente 0,2 por los valores 0,1883, 0,17, 0,1615 y 0,2585 se optimiza la representación del
364 comportamiento empírico en todo el material, en el Grado 1, el Grado 2 y el Residuo, respectivamente.
365 No obstante, el ajuste de f_m a la altura de referencia aplicando el factor con los exponentes señalados
366 arroja valores medios similares a los obtenidos con $k_h = (150 / h)^{0,2}$, con diferencias del orden de 1 %
367 para el total del material, 4 % para los grados 1 y 2, y 5 % para el Residuo. Estas diferencias
368 relativamente exiguas reafirman la conveniencia de mantener la expresión actual de k_h , la que a su vez
369 presenta la ventaja de ser aplicable a todas las especies y calidades de madera, minimizando en
370 consecuencia la probabilidad de cometer errores en su utilización. En la misma línea, Hermoso *et al.*

371 (2002) informan que la influencia de la altura sobre la resistencia a flexión en madera de pino silvestre
372 está adecuadamente expresada por el factor $k_h = (150 / h)^{0.2}$.

373

374

CONCLUSIONES

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

379 El análisis ratificó -para propósitos prácticos vinculados al diseño estructural- la efectividad del
380 criterio europeo para valorar la relación entre la altura de la sección y la tensión de rotura en el material
381 investigado. La máxima diferencia entre los resultados experimentales y los ajustados a la condición de
382 referencia según este criterio alcanzó 4 % para las muestras completas, el Grado 1, y el Grado 2, con la
383 excepción en este último caso de una muestra que exhibió una diferencia de 9 %. Para el material
384 asignado al Residuo el criterio mostró una efectividad menor, aunque las diferencias respecto de los
385 resultados experimentales no alcanzaron el límite adoptado por las normas europeas y argentinas (20
386 %) para evitar una excesiva variabilidad entre muestras.

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

390

391

BIBLIOGRAFÍA

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

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

- 397 **Borodowski, E.D. 2006.** Álamos y sauces en el delta del Paraná: situación del sector y
398 silvicultura. Disertación. Actas de las Jornadas de Salicáceas.
- 399 **Cortizo, S. 2005.** Mejores árboles para más forestadores. Subprograma álamos en el delta del
400 Paraná de la SAGPyA, Capítulo III, pág. 137 a 160.
- 401 **Denzler, J.K. & Glos, P. 2008.** Size effects in bending. International Council for Research and
402 Innovation in Building and Construction, Working Commission W18 – Timber Structures, CIB-W18,
403 paper 41-6-4, St. Andrews, Canada.
- 404 **EN 384. 2010.** Structural timber - Determination of characteristic values of mechanical properties
405 and density. European Committee for Standardization, Brussels.
- 406 **EN 408. 2010.** Timber structures - Structural timber and glued laminated timber - Determination
407 of some physical and mechanical properties. European Committee for Standardization, Brussels.
- 408 **Fank, P.; Stefani, P.; Piter, J.C. 2014a.** Efecto de la altura en la resistencia a flexión en piezas
409 de pino resinoso del noreste de Argentina. XXXVI Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural,
410 trabajo 263, Montevideo, Uruguay.
- 411 **Fank, P.; Stefani, P.; Piter, J.C. 2014b.** Resistencia y rigidez de tablas destinadas a la
412 fabricación de madera laminada encolada estructural. Análisis comparativo entre el pino resinoso
413 (*Pinus taeda/elliottii*) y el álamo (*Populus deltoides* ‘Australiano 129/60’ y ‘Stoneville 67’). IV
414 Congreso Internacional de las Salicáceas en Argentina. La Plata, Argentina.
- 415 **Fernández Golfín, J.I.; Hermoso, E.; Diez, M.R. 2002.** Análisis del efecto del volumen sobre
416 la resistencia característica a flexión de la madera de los pinos silvestre y laricio de procedencia
417 española. *Materiales de Construcción* 52(268): 43-55.
- 418 **Guillaumet, A.; Acuña Rello, L.; Piter, J.C. 2014a.** Evaluación del rendimiento de las tablas de
419 *Populus deltoides* ‘Australiano 129/60’ y ‘Stoneville 67’ para la fabricación de vigas laminadas
420 encoladas. IV Congreso Internacional de las Salicáceas en Argentina. La Plata, Argentina.
- 421 **Guillaumet, A.A.; Filippetti, M.C.; Acuña Rello, L.; Piter, J.C. 2014b.** Utilización de la
422 madera de álamo en elementos estructurales. XXXVI Jornadas Sudamericanas de Ingeniería
423 Estructural. Montevideo, Uruguay.
- 424 **Hermoso, E.; Fernández Golfín, J.I.; Diez, M.R. 2002.** Análisis del factor de altura k_h en la
425 madera aserrada estructural de pino silvestre. *Invest Agr Sist Recur For* 11 (2):441-448.
- 426 **Hermoso Prieto, E.; Díaz Barra, M.R.; Fernández Golfín, J.I.; Iñiguez González, G. 2013.**
427 Efecto del tamaño de la sección y la médula sobre la resistencia y rigidez de la madera aserrada
428 estructural de pino radiata. 6° Congreso Forestal Español. Vitoria Gasteiz. España.
- 429 **INTI CIRSOC. 2013.** Reglamento Argentino de Estructuras de Madera. Disposiciones generales
430 y requisitos para el diseño y la construcción de estructuras de madera en edificaciones. Buenos Aires,
431 Argentina, disponible en <http://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/601/CIRSOC601-completo.pdf>.
- 432 **INTI CIRSOC. 2015.** Suplementos del Reglamento CIRSOC 601-2013-. Actualización de
433 octubre 2015. Buenos Aires, Argentina, disponible en [http://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/601/sup-act-](http://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/601/sup-act-oct-2015.pdf)
434 [oct-2015.pdf](http://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/601/sup-act-oct-2015.pdf).
- 435 **IRAM 9662-4. 2015.** Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas
436 por resistencia. Parte 4: Tablas de álamo ‘Australiano 129/60’ y ‘Stoneville 67’ (*Populus deltoides*).
437 Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires, Argentina.
- 438 **IRAM 9664. 2013.** Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las
439 propiedades mecánicas y la densidad. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos
440 Aires, Argentina.
- 441 **ISO 3130. 1975.** International Organization for Standardization. Wood – Determination of
442 moisture content for physical and mechanical tests.

- 443 **ISO 3131. 1975.** International Organization for Standardization. Wood – Determination of
444 density for physical and mechanical tests.
- 445 **NCh 1198. 2007.** Madera – Construcciones en madera – Cálculo. Instituto Nacional de
446 Normalización INN-Chile, Santiago.
- 447 **NDS. 2012.** National design specification for wood construction. American Forest & Paper
448 Association Inc.
- 449 **Newlin, J.A. & Trayer, G.W. 1924.** Form factors of beams subjected to transverse loading only.
450 The influence of the form of a wooden beam on its stiffness and strength. Report No.181, Forest
451 Products Laboratory, U.S. Department of Agriculture, p. 375-393. Reprinted as Report 1310, october
452 1941.
- 453 **Piter, J.C. 2012.** Size effect on bending strength in sawn timber of fast-growing Argentinean
454 *Eucalyptus grandis*. Analysis according to the criterion of European standards. *European Journal of*
455 *Wood and Wood Products* 70(1-3):17–24.
- 456 **Ramos, R.; Gómez, R.; Torrán, E.; Piter, J.C. 2014a.** Propiedades físico-mecánicas de la
457 madera laminada encolada estructural de álamo (*Populus deltoides* ‘Australiano 129/60’ y ‘Stoneville
458 67’). Análisis conforme al criterio adoptado por la normativa europea. IV Congreso Internacional de las
459 Salicáceas en Argentina. La Plata, Argentina.
- 460 **Ramos, R.; Sosa Zitto, M.A.; Gómez, R., Torrán, E., Piter, J.C. 2014b.** Madera laminada
461 encolada estructural de álamo. Determinación empírica de su comportamiento mecánico. XXXVI
462 Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural. Montevideo, Uruguay.
- 463 **Rouger, F. 1995.** Volume and stress distribution effects. In: Timber Engineering STEP 1, Basis
464 of design, material properties, structural components and joints, B1/1-B1/8. Centrum Hout, The
465 Netherlands.
- 466 **Rouger, F. & Barrett, J.D. 1995.** Size effects in timber. In: Informationsdienst Holz, STEP 3:
467 3/1-3/24. Fachverlang Holz. Düsseldorf, Deutschland.
- 468 **UNE-EN 1310. 1997.** Madera aserrada y madera en rollo. Método de medida de singularidades.
469 Agencia Española de Normalización y Certificación. Madrid, España.
- 470 **Weibull, W. 1939.** The phenomenon of rupture in solids. In: Royal Swedish Institute for
471 Engineering Research, Proceeding N°153. Stockholm, Sweden.
- 472
473
474
475
476