

Análisis del factor de altura k_h en la madera aserrada estructural de pino silvestre

E. Hermoso *, J.I. Fernández-Golfín, M.R. Díez

CIFOR-INIA. Apartado 8111. 28080 Madrid.

hermoso@inia.es

RESUMEN

En el artículo se analiza la adecuación del factor de corrección por altura (k_h), dado por la norma UNE-EN 384 y aplicable a la corrección de la resistencia a la flexión (MOR) a una sección dada de 150×50 mm, para madera de *Pinus sylvestris* L. de diferentes procedencias españolas. Dicho análisis se aborda mediante el estudio de modelos de regresión no lineales entre el MOR y las dimensiones, aportándose los parámetros y los coeficientes de determinación de dichos modelos no sólo para el total de la población sino para cada una de las calidades visuales (ME1 y ME2) establecidas en la norma española UNE 56.544 de clasificación visual resistente de la madera aserrada.

La influencia de la altura de la sección ¹ (h) y del volumen en la resistencia a la flexión de la madera resulta significativa, especialmente en la madera de segunda calidad (ME2). El factor de altura medio (k_h) para pino silvestre resulta similar al considerado en la norma EN 384 aunque la influencia de la calidad visual resulta evidente, siendo mayor en la segunda calidad (ME2) que en la primera (ME1).

La influencia de la anchura de la sección no resulta significativa y puede ser despreciada.

Se lleva a cabo una comparación final con los resultados de un estudio sobre *Pinus nigra* realizado por este mismo equipo, concluyendo que la influencia de las dimensiones en la resistencia sobre una especie concreta debe ser analizada con independencia del resto.

Palabras clave: *Pinus sylvestris*, L., factor de altura, resistencia a flexión.

¹ Altura de la sección: dimensión mayor de la sección transversal de la pieza.
Anchura de la sección: dimensión menor de la sección transversal de la pieza.

* Autor para correspondencia:
Recibido: 4-2-02
Aceptado para su publicación: 5-4-02

INTRODUCCIÓN

En el procedimiento de cálculo de la resistencia de la madera estructural mediante criterios semiprobabilísticos (valores característicos) se incluye un efecto referido al tamaño de las piezas.

Ya en 1924, Newlin y Trayer, aportaban una teoría para explicar por qué la resistencia aumentaba al disminuir la altura de la pieza. Argumentaban que la ayuda provenía de las fibras menos comprimidas, de mayor cercanía a la fibra neutra, debido a que por su mayor proximidad al borde comprimido aportan más resistencia a piezas de altura de sección menor que a piezas de altura mayor. Incluso Freas y Selbo (1954) definieron un factor reductor de la resistencia para alturas mayores de 12 pulgadas (aproximadamente 300 mm), dado por:

$$k_h = 0,81 \frac{d^2 + 143}{d^2 + 88} \quad \text{d: altura de la sección en pulgadas}$$

Curry y Tory (1976) analizando la relación MOR-MOE (resistencia a flexión-módulo de elasticidad local) según diferentes dimensiones en madera de pino silvestre (*Pinus sylvestris L.*), abeto (*Picea abies*) y Tsuga (*Canadian western hemlock*) concluyeron que, tanto para madera limpia de defectos como para madera estructural, el MOR tomaba valores menores conforme aumentaban las dimensiones. Aunque encontraron algún leve efecto debido a la anchura de la sección, lo desecharon por intuir que se podía tratar de problemas relacionados con la elección de las muestras o ser debidos a las diferencias entre calidades.

Más adelante, Madsen (1992), realizando trabajos con madera de abeto Douglas, concluyó que el volumen de la pieza influía en su resistencia ya que conforme aquél era mayor había una mayor probabilidad de existencia de un gran nudo o defecto que afectase de forma crítica a la resistencia. Tratando de deslindar factores obtuvo que un aumento de altura de la sección suponía una disminución de la resistencia, pero en contra de lo establecido por Curry y Tory (1976) encontró un efecto significativo de la anchura sobre el MOR, de forma que al aumentar el primero aumentaba la resistencia.

Para explicar este efecto positivo de la anchura de la sección Madsen concluyó que el efecto del nudo que afecta a la anchura en la zona traccionada de una pieza de madera delgada, es más perjudicial que si ese mismo nudo actuase en una pieza con una anchura mayor.

Posteriormente, Böstrom (1994) trabajando con tres dimensiones diferentes en madera estructural de *Picea abies*, llegó a la conclusión de que el efecto del aumento de la altura minoraba la resistencia, detectando además una mayor influencia del volumen de la pieza de lo que estaba establecido hasta ese momento (Madsen, 1992). Sin embargo, observó que no existía un efecto significativo debido a la anchura.

De nuevo Böstrom (1999), continuando los estudios que ya había comenzado dirigidos a comparar diferentes métodos de determinación del módulo de elasticidad, comprobó, también con madera estructural de *Picea abies*, la influencia de la altura de la sección en estas evaluaciones, pasando a establecer regresiones que establecieran una clara relación que explicase la variación de la propiedad resistente (normalmente MOR) con la altura.

La norma Europea EN 384, que establece el sistema de cálculo de los valores característicos, ya aportaba en su primera versión de febrero de 1995 un factor de altura k_h ($k_h = (150/h)^{0.2}$) que se debía tener en cuenta a la hora de referir toda la resistencia a una sección normalizada de 150×50 mm. Una posterior versión de esta norma (julio de 1999) establecía idéntico factor de altura. En ningún momento esta norma establece un factor de anchura o de volumen, en parte debido al hecho de que al ser ensayada la madera en condiciones normalizadas la altura de la sección (h) y la longitud están íntimamente ligadas ($\text{longitud} = 18 \times h$) y a que fuera del trabajo de Madsen (1992) no se ha detectado un efecto consistente de la anchura de la sección.

El exponente del factor de altura antes citado, 0,2, se estableció como valor medio para todas las especies, basado en la experiencia de ensayo existente hasta ese momento (1995), no habiendo sido modificado con posterioridad.

No obstante lo anteriormente establecido, existen evidencias (Boström, 1994) de que para una especie concreta el efecto de la altura de la sección puede ser mayor que el establecido como medio para todas las especies por la norma EN 384. Estas evidencias justifican la comprobación de su valor real cuando se caracteriza una nueva madera o una nueva procedencia para una especie previamente caracterizada.

MATERIAL Y MÉTODOS

El estudio se realizó con madera de pino silvestre de las Regiones de Procedencia (Catalán *et al.*, 1991) de Álava, Navarra, Sistema Ibérico, Sistema Central y Cuenca, de dimensiones $100 \times 40 \times 2.000$ mm, $100 \times 50 \times 2.000$ mm, $150 \times 40 \times 3.000$ mm, $150 \times 50 \times 3.000$ mm, $150 \times 70 \times 3.000$ mm y $200 \times 70 \times 4.000$ mm, ensayándose un total de 1661 piezas (tabla 1). La selección de las piezas se realizó en parte muestreando de forma aleatoria piezas en serrería y en parte eligiendo, también aleatoriamente, árboles en pie señalados para corta, de los cuales además de piezas de tamaño estructural se obtuvieron probetas de pequeñas dimensiones para ensayos físico-mecánicos (Gutiérrez A. *et al.*, 1996).

Tabla 1
Muestra ensayada por tamaño y calidad visual

TAMAÑO (mmxmm)	CLASIFICACIÓN UNE 56544			TOTAL (N.º piezas)
	ME1 (N.º piezas/%)	ME2 (N.º piezas/%)	Rechazos (N.º piezas/%)	
<i>100 × 40</i>	38/21.8	83/47.4	54/30.8	175
<i>100 × 50</i>	27/22.5	57/47.5	36/30.0	120
<i>150 × 40</i>	30/23.1	60/46.1	40/30.8	130
<i>150 × 50</i>	101/21.4	280/59.3	91/19.3	472
<i>150 × 70</i>	15/11.8	89/70.1	23/18.1	127
<i>200 × 70</i>	15/11.5	68/52.3	47/36.1	130
<i>Otras</i>	145/28.6	270/53.2	92/18.2	507
TOTAL (N.º piezas)	371	907	383	1.661

Tras la preparación para ensayo de las piezas aserradas, consistente en su secado y cepillado a dimensiones finales, y determinadas las calidades visuales según UNE 56.544, se procedió a efectuar los ensayos de obtención de las características mecánicas para esta especie (Fernández-Golfín J.I. *et al.*, 1997), de acuerdo con la norma europea EN 408. Las propiedades ensayadas fueron la Tensión de Rotura a Flexión (MOR), el Módulo de Elasticidad en Flexión local ² (MOE) y global ³ (MOEG) y la densidad.

Una vez rotas (a flexión) las piezas y sobre las secciones de rotura se clasificó de nuevo la calidad visual y, de acuerdo con EN 408, de las probetas rotas se extrajeron piezas para la determinación de la densidad y espesor medio y máximo de los anillos.

Para la obtención de los valores característicos y medios de las poblaciones se utilizó la norma EN 384. De acuerdo con esta norma, la calidad visual empleada para aportar los valores de MOR, MOE y densidad por calidades fue la correspondiente a la sección de rotura.

Con los datos de MOE, MOR, y los valores de la anchura y altura de la sección (en mm) obtenidos de cada pieza, se procedió al análisis estadístico abordado mediante modelos de regresión no lineales basados en el utilizado por Böstrom (1994) para *Picea abies*, y que considera una altura de sección de referencia de 150 mm y una anchura de 50 mm, y cuya ecuación era:

$$\text{MOR} = A \times \left(\frac{50}{\text{Anchura}} \right)^B \times \left(\frac{150}{\text{Altura}} \right)^C \times \text{MOE}^D$$

Con este tipo de ecuaciones se estudia el efecto de las dimensiones frente a las de referencia, a través de las buenas relaciones conocidas entre la tensión de rotura a flexión (MOR) con el módulo de elasticidad (MOE). Para la madera de pino silvestre objeto de ensayo fueron ligeramente modificados respecto al de Böstrom, debido a la falta de ajuste de los modelos para esta especie, y por tanto usando:

Para la anchura de la sección (mm)

$$\text{MOR} = A * \left(\frac{50}{\text{Anchura}} \right)^B * \text{MOE}$$

Para la altura de la sección (mm)

$$\text{MOR} = A * \left(\frac{150}{\text{Altura}} \right)^C * \text{MOE}$$

Para el volumen (anchura × altura, en mm)

$$\text{MOR} = A * \left(\frac{50}{\text{Anchura}} \right)^B * \left(\frac{150}{\text{Altura}} \right)^C * \text{MOE}$$

² Módulo de elasticidad local, MOE: Es el obtenido midiendo la flecha de la sección central de la probeta respecto a un vano central de longitud igual a 5 veces la altura de la sección. Se encuentra libre de la deformación por cortante.

³ Módulo de elasticidad global, MOEG: Es el obtenido midiendo la flecha de la sección central de la probeta respecto a la luz total de la viga. Incluye deformación por cortante.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los valores de los parámetros A, B y C y de los coeficientes de determinación (R^2) de los modelos del apartado anterior figuran en la tabla 2, tanto para el total de la muestra de pino silvestre como para cada una de las clases de calidad dadas por la norma UNE 56.544 (ME1, ME2).

Tabla 2
Ajustes de la resistencia a flexión por las dimensiones

$MOR = A * \left(\frac{50}{\text{Anchura}} \right)^B * MOE$				
	A	B	C	R^2
TOTAL	$3.94 * 10^{-3}$	0.168	–	54.1
ME1	$4.61 * 10^{-3}$	0.038 *	–	42.2
ME2	$3.77 * 10^{-3}$	0.205	–	50.9

$MOR = A * \left(\frac{150}{\text{Altura}} \right)^C * MOE$				
	A	B	C	R^2
TOTAL	$3.87 * 10^{-3}$	–	0.207	54.5
ME1	$4.56 * 10^{-3}$	–	0.158	42.9
ME2	$3.69 * 10^{-3}$	–	0.242	51.5

$MOR = A * \left(\frac{50}{\text{Anchura}} \right)^B * \left(\frac{150}{\text{Altura}} \right)^C * MOE$				
	A	B	C	R^2
TOTAL	$3.88 * 10^{-3}$	0.035 *	0.188	54.5
ME1	$4.54 * 10^{-3}$	–0.102 *	0.203	43.1
ME2	$3.71 * 10^{-3}$	0.065 *	0.205	51.4

* No significativo.

De los datos de la Tabla 2 se puede observar en primer lugar que el valor del parámetro B, que tiene en cuenta el efecto de la anchura de la pieza en la resistencia a flexión, resulta estadísticamente no significativo, tanto para el ajuste, que sólo incluye la variable de la anchura (calidad ME1), como en las regresiones múltiples en las que se tienen en cuenta el efecto combinado de la anchura y de la altura de la sección. Esta conclusión, coincidente con las de Curry y Tory (1976) y las de Böstrom (1994), permiten la eliminación de la anchura del modelo sin que resulte afectado sustancialmente el ajuste.

En la Tabla 2 también se comprueba que la influencia del volumen sobre la resistencia es más notable en la madera de calidad ME2 que en la de calidad ME1. Esta conclusión confirma la establecida en su momento por Madsen (1992) ya que la calidad segunda (ME2), al presentar más defectos, presentará también mayor probabilidad de que al aumentar el volumen total haga presencia un defecto de tipo crítico que afecte a la resistencia de forma decisiva.

Este efecto de la calidad sobre el factor de corrección se corrobora al calcular el valor del factor corrector de altura para pino silvestre en cada una de las calidades, siendo el de las piezas de segunda calidad (ME2) 0,22, algo superior que el obtenido para el total (0,207) y notablemente superior que el determinado para la calidad visual primera (0,158).

Comparando estos resultados con los obtenidos con madera estructural de pino laricio (Fernández-Golfín *et al.*, 2000), se observa la coincidencia de conclusiones en cuanto a la disminución de la resistencia con el aumento de la altura de la sección y el volumen de la pieza, observándose también que estos factores son más acusados en madera de segunda calidad que en madera de primera calidad.

El valor de corrección por altura detectado en este estudio sobre pino silvestre y considerando a la población en su conjunto (no tomando en consideración la calidad de la madera), es muy próximo al establecido por la norma EN 384 (0,207 frente a 0,2), motivo por lo cual se puede afirmar que, con carácter general, la corrección por altura propuesta por la citada norma es válida para la madera de pino silvestre de procedencia nacional.

Esta conclusión, establecida para pino silvestre, no puede ni debe extrapolarse al resto de las especies nacionales ya que, por ejemplo, en el trabajo anteriormente mencionado sobre pino laricio (Fernández-Golfín *et al.*, 2000) resultó no despreciable el efecto de la anchura de la sección, produciendo con su aumento un incremento de la resistencia, es decir, que para esta especie la anchura tiene una influencia contraria a la producida por la altura. Por esta razón, para pino laricio, al contrario que para pino silvestre, existe la posibilidad de aplicar un factor de corrección por volumen en vez de sólo por altura, lo que confirma, una vez más, que este análisis debe ser efectuado a nivel de especie y no con carácter general.

CONCLUSIONES

Las conclusiones principales que se pueden extraer de los datos obtenidos en el trabajo, son las siguientes:

1. Para pino silvestre de las procedencias analizadas se observa que conforme aumenta el tamaño de la altura de la sección se produce una disminución de la resistencia. Esta conclusión confirma los resultados de estudios previos (Curry y Tory, 1976; Madsen, 1992; Böstrom, 1994 y 1999; Fernández-Golfín *et al.*, 2000), además de coincidir con lo establecido en la norma EN 384.

2. Respecto a la influencia de la anchura de la sección, se comprueba que en pino silvestre al aumentar ésta, disminuye la resistencia, aunque en menor medida que la disminución que se produce al aumentar la altura de la sección. Esta influencia es más pater-

te en piezas de calidad ME2, siendo no significativa en piezas de calidad ME1. Este resultado coincide con lo puesto de manifiesto por Böstrom (1994).

3. Al analizar el efecto del volumen (efecto cruzado de altura y anchura) se comprueba que al aumentar el volumen de la pieza disminuye la resistencia pero que en el modelo no influye de forma significativa la anchura que tenga la pieza. Por otra parte, se comprueba que este efecto es mayor en piezas de calidad visual ME2 que en piezas de calidad ME1. En este sentido las conclusiones vuelven a ser coincidentes con las de Böstrom (1994).

4. En esta especie el factor de altura medio es similar al ya estipulado por el Eurocódigo 5 (UNE ENV 1995-1-1) y la norma EN 384, es decir 0,2.

SUMMARY

Analysis of depth factor in *Pinus sylvestris* L. structural timber

An adjustment depth factor for bending strength (MOR) to the standardized size of 150 × 50 mm of different Spanish provenances of *Pinus sylvestris* is assessed. For obtaining such a factor different models are adjusted, by non-linear regression, between MOR and depth and/or width. In order to study the influence of grade such a models were obtained not only for the total population but for the two different grades (ME1 and ME2) considered in the Spanish UNE 56.544 visual grading standard.

The influence of the depth (h) and the volume into the bending strength (MOR) of timber is significant, especially in the lower grades (ME2). The average depth factor (k_h) is similar than the one considered in EN 384, even though the influence of visual quality is evident, being higher in the lower grade (ME2) than in the high grade (ME1) one.

The influence of the width has not statistical significance and can be neglected.

A final comparison with the results of another study on *Pinus nigra* is also carried out, concluding that the conclusions on a given species can't be extrapolated to others.

Key words: *Pinus sylvestris*, L., depth factor, bending Strength.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BÖSTROM L., 1994. Machine strength grading: comparison of four different systems. Swedish National Testing and Research Institute, Building Technology SP Report 1994: 49.
- BÖSTROM L., 1999. Determination of the modulus of elasticity in bending of structural timber - comparison of two methods. Swedish National Testing and Research Institute, Holz als Roh 57. 145-149.
- CATALÁN BACHILLER G., *et al.*, 1991. Regiones de procedencia *Pinus sylvestris* L., *Pinus nigra* Arn. *Subsp salzmannii* F. Monografía ICONA, ISBN 84-8014-004-6.
- CURRY W.T., TORY J.R., 1976. The relation between the modulus of rupture (ultimate bending stress) and modulus of elasticity of timber. Princes Risborough Laboratory.
- FERNÁNDEZ-GOLFÍN J.I. *et al.*, 1997. Caracterización mecánica de la madera aserrada de pino silvestre de los sistemas central e ibérico mediante probetas de tamaño estructural. Invest. Agr.: Sist. Recur. For. Vol. 6 (1 y 2): 183-214.
- FERNÁNDEZ-GOLFÍN J.I. *et al.*, 2000. Caracterización de la madera de *Pinus nigra subsp. salzmannii*. Informe final del proyecto SC96-045-C.2.
- FREAS A.D., SELBO M.L., 1954. Fabrication and design of glued laminated wood structural members. United States Department of Agriculture Technical Bulletin No. 1069.
- GUTIÉRREZ A. *et al.*, 1996. Selvicultura, caracterización y aprovechamiento del *Pinus sylvestris*: sistemas central e ibérico (pinos Valsain y Soria). Informe final del proyecto SC 93-165.
- MADSEN B., 1992. Structural behaviour of timber. Timber Engineering LTD.

- NEWLIN J.A., TRAYER G.W., 1924. Form factors of beams subjected to transverse loading only. United States National Advisory Committee for Aeronautics Report No. 181.
- UNE 56.544, 1999. Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural.
- UNE-EN 384, 1995, 1999. Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad.
- UNE ENV 1995-1-1: Proyecto de estructuras de madera. Reglas generales y reglas para la edificación.