

Análisis del efecto del volumen sobre la resistencia característica a flexión de la madera de los pinos silvestre y laricio de procedencia española

Analysis of the effect of volume on the bending strength of the spanish scot and laricio pine timber

J.I. FERNÁNDEZ-GOLFÍN, E. HERMOSO, M.R. DÍEZ

CIFOR-INIA. Laboratorio de Estructuras de madera

Fecha de recepción: 22-IV-02

Fecha de aceptación: 9-V-02

ESPAÑA

RESUMEN

Desde principios del siglo XX se conoce que la resistencia a la flexión de un elemento estructural viene afectada por su volumen.

*En el presente trabajo se analiza la influencia de la altura (h) y del espesor (t) de la sección de la pieza en la resistencia característica a flexión (f_k) de la madera de pino silvestre (*Pinus sylvestris*) y pino laricio (*Pinus nigra*) de procedencia española.*

1.733 vigas de tamaño variable entre 100x40x2500 mm y 200x70x4.500 mm, muestreadas especialmente para este trabajo, fueron ensayadas a flexión de acuerdo con la norma UNE EN 408.

La influencia de la altura de la sección y del espesor sobre la resistencia característica a flexión en ambas especies de madera resulta ser significativa aunque distinta entre ellas, lo que lleva a concluir que el efecto de la especie resulta también significativo y que la proposición de coeficientes de valor general debe efectuarse con precaución, debiéndose evitar extrapolaciones.

Se concluye también que, para ambas especies, el efecto del espesor resulta ser estadísticamente significativo, motivo por lo cual no debería ser ignorado por la normativa europea.

Finalmente, se sugiere la conveniencia de revisar el valor del factor de altura considerado en las normas UNE EN 384 y UNE ENV 1995-1-1.

SUMMARY

Since the beginning of the XX century it has been recognized that the bending strength of timber is affected by the size of the specimen.

*In the present work the influence of depth (h) and thickness (t) on the characteristic bending strength (f_k) of both Scot (*Pinus sylvestris*) and Laricio (*Pinus nigra*) pine Spanish grown timber is assessed.*

1.733 pieces of both species ranging in size from 100x40x2500 mm to 200x70x4.500 mm and especially sampled for this work, have been tested for bending in accordance with UNE EN 408 standard.

In both species, the influence of depth and thickness on the characteristic bending strength of timber is highly significant but different between them and lead to conclude that the effect of the species is also significant and thus that the proposition of general values should be done cautiously, avoiding extrapolations.

It is also concluded that, for both species, the effect of thickness seems to be highly significant and thus shouldn't be ignored by the European standards.

Finally, the convenience of revising the present depth factor considered in UNE EN 384 and UNE ENV 1995-1-1 standards is also suggested.

PALABRAS CLAVE: factor de altura, factor de tamaño, pino, madera estructural

KEYWORDS: depth factor, size factor, pine, timber

1. INTRODUCCIÓN

Desde los trabajos de Newlin y Trayer (1) (citados por Barrett y Fewell (2)) se conoce que la resistencia a la flexión de un elemento estructural de madera viene afectada por su tamaño.

Diversas teorías han sido establecidas para explicar la pérdida de resistencia que tiene lugar cuando aumenta el tamaño de una viga sometida a flexión.

Newlin y Trayer (1) sugirieron la que ha sido conocida como la “teoría del apoyo”, según la cual las fibras de la madera en la zona comprimida de una viga trabajando a flexión actúan individualmente como pequeñas columnas, encontrándose las fibras más altamente tensionadas, ubicadas cerca del borde superior de la viga, restringidas en su movimiento por el efecto de las relativamente poco tensionadas fibras que se encuentran cerca de la línea neutra. El efecto del tamaño se explica porque las fibras de la zona neutra se encuentran en una viga de reducida altura de sección más cerca del borde comprimido que en una viga de elevada altura de sección, lo que explica los mayores valores del módulo de rotura obtenidos.

Pierce (4) y Tucker (5) y, más específicamente, Weibull (6), quien trabajó sobre distintos materiales de tipo frágil incluido el hormigón, propusieron la que se ha conocido como “la teoría del eslabón más débil”, según la cual “sujeta a tensión, una cadena es tan resistente como su eslabón más débil”.

Esta teoría, cuya formulación matemática se debe a Weibull (6) y que no fue específicamente propuesta para la madera, se ha aplicado con éxito en la explicación del fenómeno bajo esfuerzos de tensión paralela y perpendicular a la fibra (Barrett (7), Colling (8)) así como bajo esfuerzos cortantes (Foschi y Barrett (9), Foschi (10), Colling (8)). El empleo de esta teoría en el caso de esfuerzos de compresión y, particularmente, en el de flexión es altamente cuestionable (Rouger y Fewell (11)).

Para aplicar el modelo de Weibull a la explicación del efecto del tamaño sobre la resistencia de una pieza se debe poder asumir que el material es frágil y estadísticamente homogéneo.

Rouger y Fewell (11), analizando las propiedades del material, explican las razones por las cuales la teoría de Weibull no resulta aplicable en la explicación del efecto del tamaño sobre la resistencia a la flexión de una pieza de madera:

1. En flexión, la madera no puede considerarse como un material frágil ya que sólo entre el 10% y el 40% de las

1. INTRODUCTION

Since Newlin and Trayer (1) (cited by Barrett and Fewell (2)) it has been recognized that the bending strength of timber is affected by the size of the specimen.

Many theories have been put forward to explain this loss of strength, which occurs as the size of the beam increases.

Newlin and Trayer (1) suggested what has become known as the “support theory” under which the fibres in compression zone of a beam working in bending act individually as small columns, being the highly stressed fibres, located near the edge of the beam, restrained by the action of those relatively unstressed fibres located near the neutral axis. The effect of the size of the beam is explained by the fact that in a shallow beam the restraining fibres are nearer to the compression edge than in the case of a deeper beam, and hence a great modulus of rupture is achieved.

Pierce (4) and Tucker (5) and, more specifically, Weibull (6), who studied brittle materials including concrete, developed the theory known as “the weakest link theory” which says that “when subjected to tension, a chain is as strong as its weakest link”.

This theory, developed mathematically by Weibull (6), has been successfully applied to explain the behaviour of timber, not only under tension parallel and perpendicular to grain (Barrett (7), Colling (8)), but under shear as well (Foschi and Barrett (9), Foschi (10), Colling (8)). Nevertheless the use of this theory in the case of compression and, particularly, in bending is highly debatable (Rouger and Fewell (11)).

To be able to use the Weibull model to explain the effect of size on strength, the assumption of the brittle and homogeneous nature of material is needed.

Rouger and Fewell (11), studying the properties of timber, explain why the Weibull model is not applicable to the explanation of the effect of size on the strength of a piece of timber:

1. In bending, timber cannot be considered as a pure brittle material because brittle failures only represent

roturas pueden considerarse como tales. Por otra parte, este porcentaje tiende a reducirse notablemente con la calidad de la madera, llegando a ser prácticamente cero en el caso de madera limpia.

2. Para ser aplicable, esta teoría asume que las irregularidades estructurales causantes de la rotura de la pieza deben distribuirse de forma homogénea por todo su interior, lo que en la madera no siempre ocurre. Así, por ejemplo, en el caso del abeto, con nudos pequeños y muy distribuidos, podría considerarse como posible, pero no en el caso de los pinos, en los que hacen acto de presencia nudos grandes y concentrados. Por otra parte, para madera clasificada visualmente el tamaño máximo de los nudos permisible por calidades se describe de forma relativa en función de las dimensiones de la pieza, por lo que, para la misma calidad, el tamaño de los defectos varía con las dimensiones de la pieza, existiendo por tanto una dependencia estadística entre el tamaño de la pieza y la resistencia de esta.

Otro hecho que es necesario considerar para explicar la no aplicabilidad de esta teoría a la madera trabajando a flexión, es que el momento flector varía a lo largo de la pieza en función de la configuración de cargas, por lo que no se trata sólo de la probabilidad de que un defecto crítico haga presencia a lo largo de la pieza sino que además se sitúe en la zona más solicitada.

Por este motivo la resistencia a la flexión de la madera depende altamente de la configuración del ensayo, no siendo, por ejemplo, la misma en un ensayo a flexión con carga centrada (máxima) que en otro con dos puntos de aplicación de carga, variando además con la distancia entre apoyos. En la Tabla 1 quedan recogidos algunos factores de conversión en función de la configuración de cargas (Madsen (3)).

Madsen (3) aporta diversos y expresivos ejemplos que demuestran que en muchos casos la aparente variabilidad que se observa en los valores de la resistencia a la flexión obtenidos con diversas configuraciones de ensayo no es debida a una variabilidad real en las propiedades del material sino a la sobresimplificación que supone el calcular la resistencia a la flexión como el cociente entre el Momento máximo y el Módulo resistente. De hecho, según demuestra este autor, la consideración en el cálculo de la resistencia de las condiciones reales del ensayo así como del efecto del tamaño de la pieza, lleva a valores prácticamente homogéneos, lo que confirma que la variabilidad observada es aparente y no imputable al material.

Es por este motivo por el cual la norma europea UNE EN 408 impone una configuración determinada en

10% to 40% of the failure modes. On the other hand it should be underlined that this percentage tends to be highly reduced by the effect of the quality of material, being practically zero in the case of clear timber.

2. To be used, this theory assumes the random location of defects within the piece, which does not always occur in timber. For Spruce and Firs, with small and distributed knots, this assumption might be true, but not for pine, with bigger and clustered knots. On the other hand, for visually graded material the permissible maximum size of knots, for every grade, is normally described as a ratio of the size of the timber and therefore, for the same quality, the size of the knots increases with the size of timber, and there is therefore a statistical dependence between the size and the strength of the piece.

Another important point to be considered when explaining why this theory is not applicable for bending members, is that the bending moment varies along the length of the member, depending on the loading configuration, and then it is not just that a large defect will be found in the span, but whether the large defect is located where the maximum moment occurs.

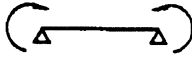
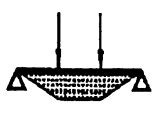

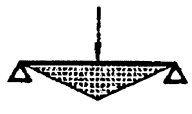

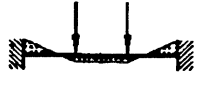

The above explains why bending strength depends to a large extent on the loading configuration, and is therefore, for instance, not the same in a bending test with the concentrated load in the centre of the span, as in another one with two equal loads placed symmetrically about the centre of the span, which can also vary depending on the distance between the load points and supports. In Table 1 some factors are summarized regarding the converting of different load configurations to a standard loading (Madsen (3)).

Madsen (3) gives different and expressive examples to demonstrate that in many cases the observed variability in bending strength, when different load configurations are involved, is apparent and not due to a true variability of wood properties, but a consequence of the gross oversimplification imposed by the calculating of bending strength as the ratio between the maximum moment and section modulus. In fact, as this author demonstrates, taking into account the true testing conditions and the effect of size in the calculus of bending strength results in much more homogeneous final values, confirming that the observed variability is not real but apparent.

Due to the above cited arguments, the UNE EN 408 European standard imposes a given testing

TABLA 1/TABLE 1

Coeficientes recomendados para la conversión en función de la configuración de las cargas, según Madsen
(Recommended values for converting different load configuration)

Configuración de cargas (Base)	Configuración de referencia/Reference configuration			Valor recomendado para código Americano (Recommended values for code purposes)
	Momento constante (Constant moment as base)	Carga aplicada en dos puntos (EN 408) (3rd point loading)	Carga Uniformemente Distribuida (UDL)	
	1.00	0.87	0.84	0.85
	1.15	1.00	0.96	0.95
	1.20	1.04	1.00	1.00
	1.40	1.22	1.17	1.15
	1.40	1.22	1.17	1.15
	1.55	1.35	1.30	1.30
	1.65	1.43	1.38	1.40

los ensayos y la norma UNE EN 384 aporta un método para calcular la resistencia característica a flexión referida a una altura de sección de 150 mm. La primera regulación de tipo normativo en madera sobre el efecto de la altura de la sección sobre la resistencia a la flexión se produjo como consecuencia de los trabajos de Freas y Selbo (12) sobre madera laminada, quienes obtuvieron un coeficiente aplicable a la corrección de la resistencia por tamaño, tomando

configuration, and UNE EN 384 provides a method for determining the characteristic values of bending strength but adjusted to 150 mm depth. The first regulation in timber on the effect of size on bending strength was based on experimental work by Freas and Selbo (12) on glulam who gave a depth factor to correct bending strength to a common depth of 50 mm. This expression was considered by the UK

como referencia una altura de la sección de la pieza de 50 mm. Esta ecuación fue empleada posteriormente en el UK Code of Practice CP 112:1967 (13) para considerar el efecto del tamaño. Corregida para considerar una altura de sección de 200 mm adopta la siguiente forma:

$$k_d = \frac{0.73 \cdot (h^2 + 92300)}{(h^2 + 56800)}$$

Una gran cantidad de datos ha sido publicada para explicar el efecto del tamaño en el comportamiento de la madera estructural. Estos resultados son en ocasiones contradictorios entre sí, debido a distintas causas, entre las que cabe citar (Rouger y Fewell (11), Rouger (14)):

- Influencia de las características de cada especie de madera. El efecto no es el mismo, por ejemplo, con los abetos que con los pinos, ya que los segundos tienen nudos más grandes y concentrados que los primeros, siendo, en este sentido, una madera mucho más heterogénea.
- Efecto del sistema de clasificación, ya que si se consideran a la vez diversas calidades este efecto puede enmascarar la influencia del tamaño sobre la resistencia.
- Efecto del sistema y del patrón de aserrado. Se ha comprobado que la resistencia de la madera dentro del árbol disminuye desde la raíz hasta la copa y aumenta desde la médula a la corteza y, por tanto, la procedencia de la madera dentro del árbol influye en la resistencia.
- Influencia de la configuración empleada en los ensayos, ya que se sabe que, por ejemplo, cuando los ensayos se realizan para configuraciones luz/altura (l/h) fijas (como en EN 408) el efecto del tamaño es una combinación del efecto de la altura de la sección (y del espesor si fuera significativo) y del de la longitud, sin que ambos efectos puedan ser identificados de forma separada.

De acuerdo con Rouger y Fewell (11) y Rouger (14) se pueden considerar varios factores distintos en el efecto del tamaño sobre la resistencia a la flexión en función del tipo de configuración de ensayo considerado:

- Efecto de longitud (para vigas ensayadas con altura de sección constante), que obedece a una expresión del tipo:

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \left(\frac{L_1}{L_2} \right)^{S_L} \quad (1)$$

- Efecto de altura de sección (para vigas ensayadas con vanos fijos), que obedece a una expresión del tipo:

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \left(\frac{h_1}{h_2} \right)^{S_h} \quad (2)$$

Code of Practice 112:1967 (13) to correct size effect. Corrected for a more common depth of 200 mm is as follows:

A vast amount of data has been published to explain size effect on timber behaviour. These results are sometimes contradictory due to different causes (Rouger and Fewell (11), Rouger (14)):

- Influence of the characteristics of each wood species. This effect is not the same, for instance, with spruces and firs as with pines, which have larger and clustered knots, and are therefore more heterogeneous timbers.*
- Effect of the grading system. If different grades are considered at the same time this effect could mask the effect of size on strength.*
- Effect of the sawing system and pattern. It is well known that timber strength decreases with the distance from the butt and increases with the distance from the pith and therefore the provenance of the timber within the tree influences the strength.*
- Influence of testing configuration, being, for instance, the size effect an inseparable combination of depth effect (and also a thickness effect if significant) and length effect when tests are conducted for constant span to depth (l/h) ratios in bending.*

According to Rouger and Fewell (11) and Rouger (14) based on a varying testing configuration, different factors for bending size effects can be considered:

- Length effect (for beams tested at constant depths), calculated by means of the expression:*

- Depth effect (for beams tested at constant spans), calculated by means of the expression:*

- Efecto de tamaño (en el caso de configuraciones l/h constantes):

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \left(\frac{L_1}{L_2}\right)^{S_L} \cdot \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^{S_h} = \left(\frac{k \cdot h_1}{k \cdot h_2}\right)^{S_L} \cdot \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^{S_h} = \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^{S_L + S_h} = \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^{S_R} \quad (3)$$

En las expresiones (1), (2) y (3) anteriores h_1 , L_1 son las dimensiones de referencia (en el caso de la normativa europea 150 mm para h_1) y h_2 ó L_2 son las dimensiones reales.

Además de las expresiones anteriores habría que considerar la correspondiente al efecto del espesor, allí donde se apreciara su incidencia, lo que daría lugar a una cuarta expresión, y coeficiente S_t , del tipo:

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \left(\frac{t_1}{t_2}\right)^{S_t} \quad (4)$$

En diferentes trabajos (Curry y Tory (15), Böstrom (16)) ha quedado demostrada la inexistencia de efectos estadísticamente significativos del espesor de la pieza sobre la resistencia, al menos cuando se trabaja con relaciones l/h constantes, lo que ha traído consigo que en la mayoría de los trabajos el efecto del espesor (coeficiente S_t) se haya ignorado y que el efecto del tamaño se haya expresado simplemente mediante el coeficiente S_R . Frente a esta constatación debe citarse el hecho de que Madsen (3), trabajando sobre abeto Douglas, sí encontró un efecto positivo y estadísticamente significativo del espesor frente a la resistencia a la flexión.

En la Tabla 2 puede verse recogido, de acuerdo con Rouger y Fewell (11), un resumen de los valores que pueden tomar los coeficientes S antes citados y su variación según autores.

De los datos de la Tabla 2 se deduce que el valor del coeficiente obtenido considerando la longitud del elemento constante (relación l/h variable, coeficiente S_h) es ligeramente inferior al determinado para una relación l/h constante (coeficiente S_R), lo que lleva a concluir que los procedimientos de ajuste por dimensiones deben ser consistentes con las metodologías adoptadas tanto para el ensayo como para el cálculo (Barrett y Fewell (2)).

Centrándonos en el caso, más frecuente (como en UNE EN 408), de una configuración de ensayos en la que la relación luz/altura (l/h) es constante (Coeficiente S_R), Barrett y Fewell (2) y Rouger y Fewell (11) aportan un resumen de los resultados de los principales trabajos sobre la materia. Un resumen de tal revisión figura en la Tabla 3.

- Size effect (for beams tested at constant span to depth ratios), calculated by means of the expression:

In the equations for size adjustments in bending given above (1, 2 and 3) h_1 and L_1 are the standardized dimensions (150 mm for h_1 in the case of European Standards) and h_2 and L_2 are the effective dimensions for the test.

In addition to the previously cited expressions, it would be necessary to consider a new one to take into account the effect of thickness, if a significative influence of this variable is detected. This expression would be as follows:

Different studies (Curry and Tory (15), Böstrom (16)) have demonstrated that there is no significant influence of thickness on bending strength, at least when constant span to depth ratio configurations are concerned, and therefore the majority of works neglect the effect of thickness (coefficient S_t) and so the influence of size is merely expressed by the coefficient S_R . Bearing this in mind, it is also important to point out that Madsen (3), working with Douglas fir, found a significative effect of thickness on bending strength.

Table 2 summarizes, according to Rouger and Fewell (11), S_i coefficient values and their variation according to different authors.

From the data included in Table 2, it can be deduced that the value of the size coefficient calculated for beams tested at constant spans (S_h coefficient) is smaller than that calculated for beams tested at constant span to depth ratios (S_R coefficient) and thus to conclude that size adjustment procedures must be chosen to be consistent with standard test procedures, and procedures specified for development of characteristic values (Barrett and Fewell (2)).

For the most common testing arrangement (as in UNE EN 408) with constant span to depth ratios (S_R coefficient), Barrett and Fewell (2) and Rouger and Fewell (11) give a summary of the results of the most important studies. This summary is included in Table 3.

TABLA 2/TABLE2

Coeficientes S_i para solicitaciones a flexión (según Rouger y Fewell (11))
(S_i coefficients for bending (Rouger and Fewell (11)))

Autor (Author)	S_L	S_h	S_R
Barrett y Fewell (1990)	0,17	0,23	0,40
Madsen (1992)	0,20	0,00	0,20
Ehlbeck y Colling (1990)	0,15	0,15	0,30

TABLA 3/TABLE3

Coeficientes de ajuste S_R de la resistencia a la flexión
(S_R coefficients for bending)

Autor (Author)	S_R
Ehlbeck y Colling (17)	0,30
Madsen (3)	0,20
Bury (18)	0,40
Fewell y Curry (19)	0,39
Barrett y Griffin (20)	0,46
Johnson <i>et al</i> (21)	0,40
Barrett y Fewell (2)	0,40

Las normas europeas consideran el efecto del tamaño de la pieza sobre la resistencia a la flexión en dos momentos distintos:

1. Al determinar los valores característicos de las propiedades estructurales de una determinada combinación de calidad, procedencia y especie y posteriormente asignar dicha combinación a una de las clases de resistencia consideradas en la norma UNE EN 338, el procedimiento establecido por la norma UNE EN 384 impone el cálculo del valor característico de la resistencia a la flexión (una de las propiedades indicadoras del material) ajustado para una altura de la sección de 150 mm, para lo cual es necesario dividir el 5º percentil de la resistencia a la flexión (determinado mediante un método no paramétrico) por un factor de tamaño k_n dado por la expresión:

$$k_n = \left(\frac{150}{h} \right)^{0.2} \quad (5)$$

2. De acuerdo con la norma ENV 1995-1-1 (Eurocódigo 5), para determinar el valor de cálculo de la resistencia a la flexión de una madera perteneciente a una clase de resistencia dada, el valor característico de la resistencia a la flexión dado para dicha clase por la norma UNE EN 338 deberá ser multiplicado por el

European standards take into account the effect of size on the bending at two different moments:

1. When assessing the characteristic values of structural properties for a specific combination of grade, source and species, and the assigning of this combination to one of the strength classes considered in UNE EN 338, the procedure given by the standard UNE EN 384 imposes the calculating of the characteristic value of bending strength (one of the indicating properties) adjusted to 150 mm depth by dividing the 5-percentile of bending strength (determined by a non-parametric method) by the size factor given by the expression:

2. According to ENV 1995-1-1 (Eurocode 5), to determine the design bending strength value for a timber belonging to a given strength class, the characteristic value of bending strength given for that class by the UNE EN 338 standard shall be multiplied

factor de altura k_h arriba citado. En este caso el máximo valor que toma el factor de altura será de 1,3 y el mínimo de 1,0.

Tal y como se dijo anteriormente, las normas europeas consideran un factor de altura k_h , común para los esfuerzos de flexión y tracción, dado por la expresión (5), en la que el coeficiente S_R es 0,2. Este valor del S_R es muy inferior que el 0,4 considerado como el más apropiado en la mayoría de los trabajos recogidos en la Tabla 3. Este valor final de 0,2 es un compromiso entre los diferentes valores considerados por el Comité CEN TC 124 ya que los resultados aportados por los diferentes estudios sobre la materia estudiados por dicho Comité sugerían valores contradictorios entre sí, incluyendo un sorprendente efecto no significativo de la altura de sección sobre la resistencia a la flexión. Desafortunadamente tales estudios nunca fueron publicados.

Este factor de altura k_h establecido por las normas europeas tiene validez general y, por tanto, no tiene en cuenta el efecto que en él pueden tener variables tales como la calidad de la madera, la especie o el sistema de aserrado.

De todo lo hasta ahora visto puede afirmarse que existen fuertes evidencias (Böstrom (16), Johansson *et al.* (22), Rouger y Fewell (11), Rouger (14)) de que para una especie concreta el efecto de la altura de la sección puede ser distinto al considerado como general en la norma UNE EN 384. Estas evidencias y el hecho de que la gran mayoría de los trabajos que figuran en la bibliografía se basan en el empleo de la madera de abeto, mucho más homogénea que la de pino, sugiere la necesidad de proceder a su comprobación en el caso de estos dos pinos españoles que, por proceder de zonas de fuerte insolación, poseen una mayor ramosidad media que los pinos y abetos procedentes de latitudes más elevadas.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo sobre madera aserrada de los pinos silvestre (*Pinus sylvestris*) y laricio (*Pinus nigra*) de procedencia española.

Para la correcta detección del efecto del tamaño de la pieza sobre la resistencia de la madera y evitar la influencia, hasta el límite de lo posible, de otros efectos tales como la variación de la calidad y características de la madera con la zona de procedencia del material, se diseñaron muestreos específicos para cada especie, de forma que la muestra usada para el presente trabajo procediese de una única zona, elegida por poseer propiedades medias para la especie. Para la selección

by the above cited size factor k_h . In this case the maximum value of k_h is 1.3 and the minimum 1.0.

As previously stated, the European standards consider a k_h depth factor, common for bending and tension, given by the expression (5), where the coefficient S_R is 0.2. This S_R value is much lower than the 0.4 considered in Table 3 as the most appropriate according to the majority of studies. This 0.2 final value is a compromise among the different values considered by the CEN TC 124, due to the fact that different reports from different research studies on the matter, suggested contradictory values, including a surprising non-significant influence of depth on the bending strength of timber. Unfortunately such works were never published.

This European depth factor k_h has a general validity, and thus does not take into account the effect of different variables such as the quality of timber, sawing pattern or the species.

From the above cited, it is possible to say that there is strong evidence (Böstrom (16), Johansson *et al.* (22), Rouger and Fewell (11), Rouger (14)) to suggest that for a given species the depth effect on bending strength could be different to that considered as general in UNE EN 384 standard. This evidence and the fact that the majority of published research works are based on the use of timber from spruces and firs, which is much more homogeneous than pine timber, suggest the need to proceed with assessing the correct values in the cases of these two different Spanish pines, which coming from very sunny areas usually reflect more averaged knottiness than the pines and firs coming from higher latitudes.

2. MATERIAL AND METHODS

The study was carried out on scot pine (*Pinus sylvestris*) and laricio pine (*Pinus nigra* sp. *Saltzmannii*) timber of spanish provenance.

For a correct detection of the effect of the size on the strength of a piece of timber and avoid, as far as possible, the influence of other effects, such as the variation of quality and wood properties induced by the zone of provenance of timber, specific samplings for each species were designed, and thus the sample for each species came from an unique and selected area, chosen to have averaged properties within the species. To select the correct sampling area the data and results

de la zona de muestreo se emplearon los datos generados en trabajos anteriores sobre estas especies (Fernández-Golfín *et al.* (23-25); Gutiérrez Oliva *et al.* (26)).

Elegida la zona de muestreo para cada especie, se seleccionó, en un aserradero de la zona, madera con las siguientes dimensiones (en seco): 100x40x2.500 mm, 100x50x2.500 mm, 150x40x3.500 mm, 150x50x3.500 mm, 150x70x3.500 mm, 200x50x4.500 mm y 200x70x4.500 mm. La Tabla 4 recoge un resumen del muestreo efectuado.

Toda la muestra de madera cumplía con los requerimientos dimensionales de la clase de tolerancia 2 de la norma UNE EN 336, para una humedad media del 12%.

Tras el acondicionado de las probetas a 20 °C/65% Hr durante dos semanas y determinadas las calidades visuales de cada una de las piezas según la norma española de clasificación visual de la madera aserrada con destino estructural, UNE 56.544, se procedió a realizar los ensayos según UNE EN 408. Las propiedades ensayadas fueron la resistencia a flexión (f_m), el Módulo de Elasticidad en Flexión, local y global (E_l y E_g), así como la densidad. Los valores característicos y medios correspondientes a cada sección y especie fueron determinados de acuerdo con UNE EN 384.

*extracted in previous works on those species were considered (Fernández-Golfín *et al.* (23-25); Gutierrez Oliva *et al.* (26)).*

Once the sampling area for each species had been chosen, the sampling process took place in a sawmill in that area by selecting 100x40x2.500 mm, 100x50x2.500 mm, 150x40x3.500 mm, 150x50x3.500 mm, 150x70x3.500 mm, 200x50x4500 mm and 200x70x4.500 mm dried and planned material. Table 4 summarizes the characteristics of the samples for each species.

All the sampled boards fulfilled the dimensional requirements of class of tolerance 2 of UNE EN 336 standard, for an averaged moisture content of 12%.

After conditioning to 20° C/65% Hr for two weeks, all the sampled boards were first visually graded in accordance with to the Spanish visual grading for structural purposes standard UNE 56544 and then tested in accordance with the UNE EN 408 procedure. Bending strength (f_m), local and global Modulus of Elasticity (E_l and E_g) and density were tested. The characteristic and mean values of each section and species were calculated in accordance with the UNE EN 384 procedure.

TABLA 4/TABLE 4

Resumen del muestreo
(*Sampling summary*)

Especie (<i>Species</i>)	Sección (<i>Sampled section</i>) (mm)	Nº de muestras (<i>Nº of boards</i>)
Pino silvestre (<i>Scot pine</i>)	100x40x2500	111
	100x50x2500	120
	150x40x3500	130
	150x50x3500	130
	150x70x3500	126
	200x50x4500	120
	200x70x4500	130
	Total	867
Pino laricio (<i>Laricio pine</i>)	100x40x2500	120
	100x50x2500	119
	150x40x3500	117
	150x50x3500	124
	150x70x3500	119
	200x50x4500	125
	200x70x4500	142
	Total	866

De acuerdo con Madsen (3), en la madera la magnitud del efecto del tamaño sobre la resistencia depende del nivel de dicha resistencia; esto es, resulta mayor en la rama inferior de la distribución de resistencias y menor en la superior. Siguiendo el procedimiento del método conocido como "Parámetro de forma" (Madsen (3)), para obtener una imagen más clara del efecto del tamaño de la sección sobre la resistencia, para obtener los valores del factor de tamaño en ambas especies sólo se consideraron los valores de las propiedades mecánicas de aquellas piezas clasificadas como de segunda calidad (ME2) de acuerdo con la norma UNE 56544.

Para la evaluación del efecto del tamaño de la pieza sobre la resistencia se ajustaron modelos de regresión no lineal del tipo

$$Y = A * \left(\frac{150}{h}\right)^b * \left(\frac{50}{t}\right)^c$$

en los que las dimensiones de referencia son de 150 mm para la altura de cara (h) y de 50 mm para el espesor (t).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 5 figuran, para cada una de las especies y dimensiones, los valores característicos de la resistencia a la flexión (f_k) correspondientes al material clasificado como ME2.

According to Madsen (3), in timber the magnitude of size effect is dependent upon strength level, i.e. larger at the weaker end of the distribution, and smaller in the strong portion. Following the "shape parameter" procedure (Madsen (3)), to obtain a clearer picture of the effect of size on strength, only the mechanical properties of the second quality (ME2), in accordance with UNE 56544, boards were considered to derive size factors in both species.

To evaluate the effect of size on bending strength non-linear models like

were fitted by regression, where the standardized dimensions were 150 mm for depth (h) and 50 mm for thickness (t).

3. RESULTS AND DISCUSSION

Table 5 gives a summary of the characteristic values of bending strength (f_k) of ME2 graded material for each species and sizes.

TABLA 5/TABLE 5

Valores característicos (ME2)
(Characteristic values)

Especie (Species)	Sección (Sampled section) (mm)	f_k (MPa)
Pino silvestre (Scot pine)	100x40x2500	18.8
	100x50x2500	21.2
	150x40x3500	19.2
	150x50x3500	18.0
	150x70x3500	21.5
	200x50x4500	17.4
	200x70x4500	19.3
Pino laricio (Laricio pine)	100x40x2500	27.0
	100x50x2500	27.8
	150x40x3500	20.8
	150x50x3500	19.1
	150x70x3500	26.1
	200x50x4500	20.5
	200x70x4500	24.1

En la Tabla 6 figuran los valores de los parámetros A, b y c y de los coeficientes de determinación (R^2) de los modelos de regresión del tipo

Table 6 includes the final values for Scot and laricio pine timber, of A, b and c parameters and of the coefficients of determination (R^2) of the models

$$Y = A * \left(\frac{150}{h}\right)^b * \left(\frac{50}{t}\right)^c$$

ajustados a los datos de la Tabla 5, tanto para pino silvestre como para pino laricio.

fitted by regression to the data of Table 5.

TABLA 6/TABLE 6

Coefficientes de determinación y parámetros de los modelos de regresión
(Coefficients of determination and parameters of the regression models)

$$Y = A * \left(\frac{150}{h}\right)^b * \left(\frac{50}{t}\right)^c$$

Especie (Species)	A	b	c	R^2
Pino silvestre (Scot pine)	18.97***	0.23***	-0.29***	55.5%
Pino laricio (Laricio pine)	22.74***	0.51***	-0.42**	62.0%
*** Significativo al 99% (Significative to 99%)				
** Significativo al 95% (Significative to 95%)				

4. CONCLUSIONES

Las conclusiones principales que se pueden extraer de los datos obtenidos en el trabajo (Tabla 6), son las siguientes:

1. Tanto en pino silvestre como en pino laricio se observa una reducción de la resistencia característica a flexión (f_x) con el aumento en el tamaño de la cara. Esta conclusión concuerda con los resultados de estudios previos (Curry y Tory (15), Madsen (3), Böstrom (16), Fernández-Golfín *et al.*, (24)).

2. El valor del factor de altura hallado para el pino silvestre resulta ser del mismo orden de magnitud que el citado en las normas UNE EN 384 y UNE ENV 1995-1-1. En pino laricio el efecto de la altura de la sección sobre la resistencia característica a flexión parece ser muy superior al observado en pino silvestre y, por consiguiente, al considerado en la normativa europea. En ambas especies el efecto de la altura de la sección sobre la resistencia a la flexión es altamente significativo.

3. Respecto de la influencia del espesor (t), tanto en pino silvestre como en pino laricio se observa el mismo comportamiento. apreciándose que la resistencia característica a flexión aumenta con el espesor (efecto inverso al de la altura de la sección). Esta conclusión

4. CONCLUSIONS

The following conclusions may be drawn from the results set forth in Table 6:

1. For spanish grown laricio and Scot pine timbers a loss of characteristic bending strength (f_x) with depth can be observed. This conclusion coincides with the results of previous studies on the matter (Curry and Tory (15), Madsen (3), Böstrom (16), Fernández-Golfín *et al.* (24)).

2. Depth factor for Scot pine timber is very close to that considered in European standards UNE EN 384 and ENV 1995-1-1. In laricio pine timber the effect of depth on bending strength seems to be much higher than that observed for Scot pine and thus greater than that considered in the European standards. In both species the effect of depth on bending strength is highly significative.

3. As far as the effect of thickness is concerned, both species exhibit the same pattern, and it can be observed that the bending strength increases as the thickness increases (just the opposite to with depth). This

concuere con los resultados obtenidos por Madsen (3). En ambas especies el efecto del espesor es estadísticamente significativo. Al igual que con el factor de altura, el efecto del espesor parece ser más acusado en pino laricio que en pino silvestre, confirmando la influencia de la especie en el efecto del tamaño sobre la resistencia.

4. La comparación entre los valores observados para pino silvestre y pino laricio lleva a deducir que en el efecto del volumen sobre la resistencia a la flexión tiene también una influencia significativa la especie de madera, lo que plantea la duda sobre la conveniencia de considerar un único factor válido para todas las especies de madera.

5. De todo lo anterior parece deducirse que, para el material ensayado, el efecto del volumen de la pieza sobre la resistencia característica a flexión de la madera parece resultar muy superior al considerado en las normas europeas, planteando la conveniencia de la reconsideración de los valores incluidos en la norma.

conclusion coincides with the results of Madsen (3). Both species exhibit a significant effect of thickness. As previously stated with depth, the effect of thickness seems to be much higher in laricio pine than in Scot pine, confirming the influence of species on the effect of size on strength.

4. The comparison between the observed values for Scot and laricio pine timber leads to the conclusion that the effect of volume on bending strength can be significantly influenced by the effect of species, and thus raises the doubt on whether a single factor is valid for all the species of timber.

5. From all that cited above, it can be concluded that, at least for the tested material, the effect of volume on the characteristic bending strength of timber seems to be much higher than that considered by European standards, and so it is possible that the value already included in the standard should be reconsidered.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) Newlin, J. A., Trayer, G. W. (1924) *From factor of beams subjected to transverse loading only*. NACA report N° 181.
- (2) Barrett, J. D.; Fewell, A. R. (1990). *Size factors for the bending and tension strength of structural timber*. Proceedings CIB - W18/23-10-3.
- (3) Madsen, B. (1992). *Structural behaviour of timber*. Timber Engineering LTD. ISBN 0-9696162-0-1.
- (4) Pierce, F. T. (1926). *Tension tests for cotton yarn*. Journal of the Textile Institute, 1926, pp:T155-T368.
- (5) Tucker, J. (1927) *A study of the compressive strength dispersion of material with applications*. Journal of the Franklin Institute, 204: 751-781.
- (6) Weibull, W. (1939) *A statistical theory of the strength of materials*. Royal Swedish Institute for engineering research. proceedings n° 141, 45 pp.
- (7) Barrett, J. D. (1974) *Effect of size on tension perpendicular to grain strength of Douglas fir*. Wood and fibre 6(2): 126-143
- (8) Colling, F. (1986). *Influence of volume and stress distribution of the shear strength and tensile strength perpendicular to grain*. Proceedings of the CIB-W18A/19-12-3. Florence, Italy
- (9) Foschi, R. O., Barrett, J. D. (1975) *Longitudinal shear strength of Douglas fir*. Canadian Journal of Civil engineering 3(2):198-208.
- (10) Foschi, R. O (1985). *Longitudinal shear design of glued laminated beams*. Proceedings of the CIB-W18A/18-10-12. Beit Ore, Israel.
- (11) Rouger, F., Fewell, A. T. (1994). *Size effects in timber: Novelty never ends*. Proceedings Proceedings of the CIB-W18A/27-5-2, Sydney, Australia.
- (12) Freas, A. D., Selbo, M. L. (1954) *Fabrication and design of glued laminated wood structural members*. USDA Technical bulletin N° 1069.
- (13) CP 112: Part 2: (1967). *The structural use of timber*. BSI
- (14) Rouger, F. (1995). *Volume and stress distribution effects*. STEP, Volume 1, lecture B1. ISBN 90-5645-001-8.
- (15) 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 CP 30/76.
- (16) Böstrom, L., (1994). *Machine strength grading: comparison of four different systems*. Swedish National Testing and Research Institute, Building Technology SP Report 1994: 49.
- (17) Ehlbeck, J., Colling, F. (1990). *Bending strength of glulam beams, a design proposal*. CIB-W18A/23-12-1. Lisbon, Portugal.
- (18) Bury, K.V. (1981). *Statistical analysis of NLGA bending tests*. University of British Columbia.
- (19) Fewell, A. R., Curry, W. J. (1983) *Depth factor adjustments in the determination of characteristic bending stresses for visually graded timber*. Structural Engineer Vol. 61B, N° 2.
- (20) Barrett, J. D.; Griffin (1989). *Size effects for Canadian 2-inch (38 mm) dimension lumber*. Proceedings CIB-W18A/22-6-1 Berlin.
- (21) Johnson, L. A.; Evans, J. W.; Green, D.W. (1989). *Volume effect adjustments for the in-grade data*. In-grade Testing of Structural Lumber. Forest Products research Society. Madison. Wisc.
- (22) Johansson, C. J. *et al.* (1998) *Laminations for glued laminated timber- Establishment of strength classes for visual strength grades and machine settings for glulam laminations of Nordic origin*. SP Report 1998:38..

- (23) 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.
- (24) Fernández-Golfín, J. I. *et al.* (2000). *Caracterización de la madera de Pinus nigra subsp. salzamannii*. Informe final del proyecto SC96-045-C.2.
- (25) Fernández-Golfín, J. I. *et al.* (2001). *Estudio de la calidad de la madera del Pinus nigra*. En Gestión forestal sostenible de los pinares de Pinus nigra: Alto Tajo, Serranía de Cuenca, Sierras de Cazorla y Segura: 97-122 ISBN-84-86793-82-3.
- (26) 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.
- (27) UNE 56.544, (1999). *Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural*. AENOR
- (28) UNE ENV 1995-1-1 *Eurocodigo 5: proyecto de estructuras de madera*
- (29) UNE EN 336 *Madera estructural. Coníferas y chopo. Desviaciones permisibles respecto de las dimensiones*.
- (30) UNE EN 338 *Madera estructural. Clases resistentes*
- (31) UNE EN 384, 1995, 2000. *Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad*.
- (32) UNE EN 408: 1995, 2001. *Madera estructural. Madera serrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas*.
- (33) UNE EN 1912: 1999. *Madera estructural. Clases resistentes. Asignación de especies y calidades visuales*.

* * *