

Evaluación de la capacidad portante de piezas de gruesa escuadría de madera de conífera en estructuras existentes

Evaluation of the load carrying capacity of large cross section coniferous timber in standing structures

F. ARRIAGA^(*), M. ESTEBAN^(*), E. RELEA^(**)

^(*)Universidad Politécnica de Madrid, ^(**)Universidad de Valladolid
Persona de contacto/Corresponding author: farriaga@montes.upm.cs

Fecha de recepción: 13-X-04

Fecha de aceptación: 8-III-05

ESPAÑA

RESUMEN

Se han clasificado visualmente 85 piezas de madera de gruesa sección (Pino silvestre y Pino pinaster) procedentes de varios edificios antiguos de acuerdo con las normas UNE 56544 y DIN 4074. El objetivo es establecer una metodología no destructiva para asignar propiedades mecánicas a las piezas de estructuras existentes de madera con gruesas escuadrías con un nivel de seguridad y de rendimiento aceptables. Se propone un único grado de calidad con un porcentaje bajo de rechazos, aplicando los principales parámetros de la clasificación visual. De esta forma, se establece una clase resistente específica para las piezas de gruesa escuadría de estructuras de madera de conífera existentes definida como F14/E9/D380 (resistencia característica a flexión igual a 14 N/mm², módulo de elasticidad de 9 kN/mm² y densidad característica de 380 kg/m³). Para alcanzar una clase resistente superior se propone utilizar el parámetro añadido de la velocidad de propagación de ultrasonidos con un límite de 4.900 m/s. En este caso la clase resistente alcanzada sería F16/E10/D380.

PALABRAS CLAVE: clasificación visual, evaluación estructural, madera, rehabilitación, ultrasonidos.

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo principal de este trabajo es la caracterización de la madera de gruesa escuadría orientada a la evaluación de estructuras antiguas de madera. Los valores característicos de las propiedades mecánicas de la madera pueden obtenerse mediante la aplicación de normas de clasificación visual y la asignación de la clase resistente correspondiente de acuerdo con la norma EN 338 (1). Sin embargo, la mayoría de los valores característicos que se derivan de este procedimiento han sido obtenidos mediante el ensayo de piezas de una sección transversal reducida (normalmente, menos que 70x200 mm) (2-5). En edificios antiguos era frecuente el empleo de gruesas secciones en las piezas estructurales (del orden de 130x200 a 180x300 mm). No existe evidencia de que las reglas de

SUMMARY

A total of 85 large section timber pieces (*Pinus sylvestris L.* and *Pinus pinaster Ait.*) found in a number of old buildings were visually analyzed and graded pursuant to Spanish standard UNE 56544 and German standard 4074. The object was to formulate a non-destructive method to reliably and effectively determine the mechanical properties of existing timber structures with large cross sections. A new system is proposed based on the chief visual grading parameters and consisting in a single grade; the percentage of rejections with this system is low. In this regard, a specific strength class is established for large cross section members in existing coniferous wood structures, namely F14/E9/D380 (MOR of 14 N/mm², MOE of 9 kN/mm² and characteristic density of 380 kg/m³). The use of ultrasonic velocity is proposed to define the next higher strength class - F16/E10/D380, to which timber with velocities of 4,900 m/s or over would be assigned.

KEYWORDS: visual grading, structural assessment, timber, rehabilitation, ultrasonics.

1. INTRODUCTION

This study aims primarily to characterize large section timber with a view to evaluating historic wood structures. The characteristic values of the mechanical properties of timber can be obtained by applying visual grading standards assignment of the material to the respective strength class as laid down in European standard EN 338 (1). However, whilst most of the characteristic values charted in this standard were obtained by testing timber with small cross sections (usually less than 70x200 mm) (2-5), the structural pieces used in older buildings often have much wider sections (ranging from 130x200 to 180x200 mm). There is no evidence to support the direct applicability of existing visual grading rules to

clasificación visual sean directamente aplicables a la madera de gruesa escuadria con los mismos resultados de las propiedades mecánicas.

La clasificación visual resistente de las piezas se ha realizado utilizando la norma española UNE 56544 (6) y la alemana DIN 4074 (7). La última versión de 2003 de la norma UNE 56544 incluye algunas modificaciones respecto a la versión anterior de 1997 como son unos límites más restrictivos para los nudos de margen y la consideración especial de los nudos en piezas con una relación altura/anchura de la sección transversal no superior a 1,5, con el fin de establecer un límite conservador del tamaño de los nudos en secciones de gran escuadria. La norma DIN 4074 establece diferentes categorías de tamaños de las secciones en función de las dimensiones y la relación entre la altura y anchura de la sección. Las piezas de gruesa escuadria se definen como aquellas piezas con una anchura de la sección mayor que 40 mm y una altura mayor o igual que la anchura pero no mayor que tres veces la dimensión de la altura. Ambas normas recogen el mismo método de medición y especificación para la desviación de la fibra, gemas y fendas, pero difieren en la manera de medir los nudos; el procedimiento de la DIN 4074 es más sencillo.

Por otro lado, la aplicación estricta de las reglas de clasificación implica la medición de varias singularidades (nudos, fendas, desviación de la fibra, gemas, etc.) en todas las caras de la pieza. Esto no es posible en la inspección de una estructura existente por razones de orden práctico; es más realista utilizar un método simplificado para la clasificación visual y, en algunos casos, incluir mediciones no destructivas como la velocidad de propagación de los ultrasonidos. Generalmente, la aplicación de unas reglas de clasificación visual a una estructura de madera antigua da como resultado un elevado porcentaje de piezas rechazadas. Este hecho dificulta la aceptación de una estructura antigua que ha sobrevivido sin problemas, en algunos casos, por cientos de años (8).

2. MATERIAL ENSAYADO

El material utilizado fue obtenido de varios edificios antiguos que habían sido desmontados parcialmente durante las obras de rehabilitación. Las características generales y los orígenes de cada uno son los siguientes:

- Serie A: 20 viguetas de forjado con una sección de 130x180 mm y una longitud de 4 a 5 m. Edificio de 1861 (Madrid). Especie de madera: 15 piezas de *Pinus sylvestris* L. y 5 de *Pinus pinaster* Ait.
- Serie B: 14 pares con una sección de 120x160 mm y una longitud de 4 m. Edificio de 1900, aproximadamente (Madrid). Especie de madera: *Pinus sylvestris* L.
- Serie C: 3 viguetas de forjado con secciones del orden de 96-129x166 mm y una longitud de 4 m. Edificio de 1836 (Madrid). Especie de madera: *Pinus sylvestris* L.

determine the mechanical properties of timber pieces with large cross sections.

The pieces studied were visually graded for strength as laid down in spanish standard UNE 56544 [6] and German standard DIN 4074 (7). The latest version of UNE 56544, dating from 2003, contains certain amendments with respect to the earlier 1997 version. These include stricter rules about margin knots and special requirements with respect to knots in pieces with a depth/width ratio of 1.5 or smaller to define a conservative limit for knot size in large cross section pieces. The standard DIN 4074 establishes different section size categories depending on dimensions and the depth:width ratio. Pieces with large sections are defined as having a width of over 40 mm and a depth greater than or equal to the width but not greater than three times the width. The two standards specify the same method for measuring and specifying the slope of the grain, wanes and shakes, but differ with respect to knot measurement: the procedure described in the German standard is simpler.

Moreover, the strict application of grading rules entails measuring the different features (knots, shakes, slope of grain, wanes and so on) on all the faces of the piece. For practical reasons, this is hardly possible when inspecting a standing structure: it is more reasonable to use a simplified method for visual grading, supplemented in some cases with non-destructive methods such as ultrasonic velocity testing. Generally speaking, a large number of pieces are rejected when visual grading rules are applied to a historic wood structure, making it difficult to accept older structures that have remained standing, sometimes for hundreds of years, without a flaw (8).

2. MATERIALS TESTED

The material used was obtained from several old buildings that had been partially dismantled for rehabilitation. The general characteristics and origins of each are listed below:

- Series A: 20 floor joists with a section of 130x180 mm and a length of 4 to 5 m. Building dating from 1861 (Madrid). Timber species: 15 *Pinus sylvestris* L. and 5 *Pinus pinaster* Ait.*
- Series B: rafters with a section of 120x160 mm and a length of 4 m. Building standing since approximately 1900 (Madrid). Timber species: *Pinus sylvestris* L.*
- Series C: 3 floor joists with a section on the order of 96-129x166 mm and a length of 4 m. Building dating from 1836 (Madrid). Timber species: *Pinus sylvestris* L.*

- Serie D: 28 pares y viguetas de forjado con una sección del orden de 140x195 mm y una longitud de 4,5 a 5 m. Edificio de finales del siglo XVIII (Aranjuez, Madrid). Especie de madera: *Pinus sylvestris* L.
- Serie E: 20 piezas procedentes de cerchas de una cubierta de un edificio industrial de 1951 (Valladolid). Sección transversal de 98-115x185 –209 mm y una longitud de 2,8 a 3,5 m. Especie de madera: 6 *Pinus sylvestris* L. y 14 de *Pinus pinaster* Ait.

3. METODOLOGÍA

3.1. Registro de la geometría

Se registraron todos los detalles relevantes de las piezas. Las dimensiones de la sección transversal y las deformaciones de la pieza se registraron de acuerdo con un sistema de ejes de referencia para cada cara y cada tramo de 30 cm (Figura 1). También se anotaba la posición de la médula en las testas de la pieza, la proporción de albura/duramen y los daños de origen biótico (normalmente insectos). Todas las singularidades relacionadas con las reglas de clasificación, tales como el tamaño y la posición de los nudos, fendas, gemas y desviación de la fibra quedaban incluidas en este registro (Figura 2). El objetivo de este procedimiento era mantener toda la información po-

- Series D: 28 rafters and floor joists with a section on the order of 140x195 mm and a length of 4.5 to 5 m. Late eighteenth century building (Aranjuez, Madrid). Timber species: *Pinus sylvestris* L.

- Series E: 20 pieces from the trusses on a commercial building standing since 1951 (Valladolid). Cross section measurements 98-115x185 – 209 mm and a length of 2.8 to 3.5 m. Timber species: 6 *Pinus sylvestris* L. and 14 *Pinus pinaster* Ait.

3. METHODS

3.1. Geometrical data recording

All relevant features of the pieces were recorded. Cross section dimensions and any defects in pieces were recorded in keeping with a system of reference axes on each face, spaced at 30-cm intervals as shown in Figure 1. The pith position on the ends and the proportion of sapwood/heartwood were likewise noted, along with any biological damage (generally due to insects). All features relating to grading such as knot size and position, shakes, wanes and slope of grain were recorded (see Figure 2). The objective of this procedure was to store as much information as

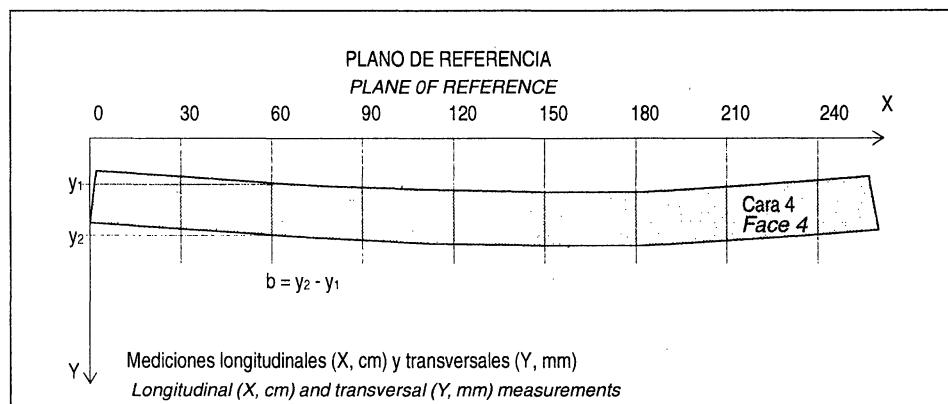


Figura 1.- Registro de dimensiones y deformaciones.
Figure 1.- Sample of dimension and deflection record.

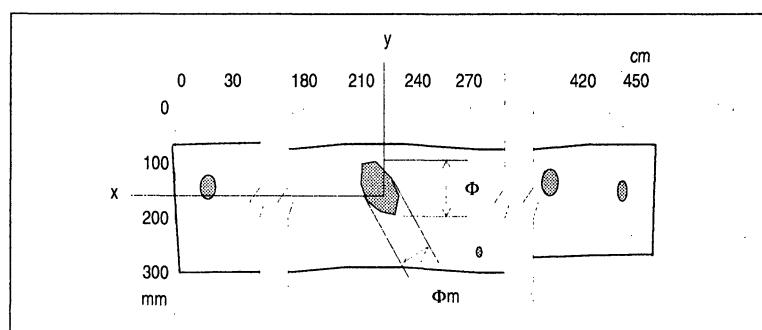


Figura 2.- Registro de singularidades de clasificación.
Figure 2.- Sample of grading characteristics record.

sible para futuros análisis, incluso una vez que las piezas hayan desaparecido.

3.2. Clasificación visual

Las piezas fueron clasificadas de acuerdo con las normas UNE 56544 y DIN 4074. La calidad se asignó a la zona de la sección de rotura después del ensayo mecánico. La norma DIN fue elegida porque incluye un procedimiento con consideraciones específicas para piezas de gran escuadria. La norma UNE fue modificada a partir de su última versión (1997) teniendo en cuenta el caso de las gruesas escuadrías. En las Tablas 1 y 2 se recogen los resultados de clasificación para cada uno de los parámetros de clasificación.

El porcentaje de piezas rechazadas es demasiado elevado en ambas normas cuando se emplea el criterio completo para la clasificación. La causa principal para el rechazo se encuentra en el defecto de las gomas. En realidad no es un defecto que pueda reducir la resistencia del material, sino que es, simplemente, una pérdida de sección transversal. El efecto de las gomas en la capacidad portante de la pieza podría considerarse de otra manera. Las fendas constituyen también otro defecto con un alto porcentaje de rechazo, pero en las gruesas escuadrías son inevitables. Además, el efecto de las fendas en la resistencia y rigidez es bajo (9) y la tendencia actual de las normas de clasificación se dirige a reducir su influencia. Utilizando el criterio parcial, el porcentaje de rechazo se reduce a unos valores más aceptables y este es el criterio utilizado en adelante. El rendimiento de ambas normas se compara en la Tabla 3.

3.3. Mediciones con ultrasonidos

La velocidad de propagación de los ultrasonidos se ha registrado mediante el equipo Sylvatest Duo. El equipo emite una onda de frecuencia ultrasónica que se transmite a través del material por medio de un sensor emisor y es recibido por un receptor. Los sensores tienen forma cónica y no requieren gel de contacto para lograr una buena transmisión. Conocido el tiempo empleado para recorrer la distancia conocida es posible obtener la velocidad de propagación.

A partir de la velocidad, v , y la densidad del material, ρ , se puede deducir el módulo de elasticidad dinámico, E_d , mediante la ecuación $E_d = v^2 \cdot \rho$.

Esta técnica ha sido utilizada y estudiada ampliamente en la inspección de piezas de madera de estructuras existentes (10) tanto para la caracterización de la madera de roble (11) como para la madera aserrada y los productos derivados de la madera (12). Sandoz, desarrolló su aplicación para la estimación de la resistencia de la madera de abeto y propuso la posibilidad de la clasificación a

possible for future analysis, even after the pieces had disappeared.

3.2. Visual grading

The pieces were graded based on the state of the area around the section ruptured during mechanical testing. The provisions of standards UNE 56544 and DIN 4074 were followed throughout. The DIN standard was chosen because it includes a procedure that specifically addresses large cross section pieces. The latest version of the UNE standard, in turn, had been amended with respect to the preceding version (1997) to take account of large sections. Tables 1 and 2 show the grading results for each parameter.

The percentage of pieces rejected is too high under either of the two standards when all the grading criteria are used. The chief reason for rejection is the wanes. But this defect does not in fact lower the strength of the material: it merely entails a loss of cross section area. The impact of wanes on piece carrying capacity should perhaps be broached differently. Shakes are another flaw that prompt a high percentage of rejections, but are inevitable in large cross sections. Moreover, shakes have only a minor effect on strength and stiffness (9) and the present trend in grading standards is to mitigate their importance. Since the percentage of rejections dropped to more acceptable values only the chief two grading parameters were considered, this was the procedure used in the present study. The results obtained with the two standards are compared in Table 3.

3.3. Ultrasonic velocity measurements

Ultrasonic velocity was measured with a Sylvates Duo facility fitted with an emitter sensor that sends an ultrasonic frequency sound wave through the material and a receiver sensor that receives the signal. Being cone-shaped, neither sensor requires contact gel for good transmission. The velocity of propagation can be deduced from the time it takes the wave to travel through the known distance in the sample.

The dynamic modulus of elasticity, E_d , can be found by substituting the values of velocity, v , and material density, ρ , in the equation $E_d = v^2 \cdot \rho$.

This technique has been amply used and studied in the inspection of timber in standing structures (10) to grade round (11) and sawn timber and wood-based products (12). It was developed to estimate spruce strength by Sandoz, who proposed using the average velocities for grading (13). After studying four automatic strength grading methods, including ultrasonic measurements, also for

TABLA 1/TABLE 1

Resultados de la clasificación visual de acuerdo con la norma UNE 56544. Porcentaje de piezas que cumplen los parámetros de clasificación

Results of visual grading pursuant to Standard UNE 56544. Percentage of pieces meeting grading parameter requirements

Parámetro/Parameter	Calidad (porcentajes de piezas, %) Grade (percentage of pieces, %)		
	ME-1	ME-2	Rechazos/Rejected
a.1- Nudos de canto/ <i>Edge knots</i>	61	36	3
a.2- Nudos de cara/ <i>Face knots</i>	32	64	4
a.3- Nudos de margen/ <i>Margin knots</i>	70	28	2
b.- Desviación de la fibra/ <i>Slope of grain</i>	76	20	4
c.1- Fendas (profundidad)/ <i>Fissures (depth)</i>	66	23	11
c.2- Fendas (longitud)/ <i>Fissures (length)</i>	100	0	0
d.- Gemas/ <i>Wanes</i>	49	10	41
Criterio de clasificación/ <i>Grading criterion</i>	Porcentaje de piezas (%)/ <i>Percentage of pieces (%)</i>		
a+b+c+d	9	39	52
a+b	17	73	10

TABLA 2/TABLE 2

Resultados de la clasificación visual de acuerdo con la norma DIN 4074. Porcentaje de piezas de madera que cumplen con los parámetros de clasificación

Results of visual grading pursuant to Standard DIN 4074. Percentage of pieces meeting grading parameter requirements

Parámetro/Parameter	Calidad (porcentaje de piezas, %) Grade (percentage of pieces, %)			
	S13	S10	S7	Rechazos/Rejected
a.1- Nudos de canto/ <i>Edge knots</i>	51	29	14	6
a.2- Nudos de cara/ <i>Face knots</i>	40	51	8	1
b.- Desviación de la fibra/ <i>Slope of grain</i>	54	28	16	2
c. Fendas/ <i>Fissures</i>	66	10	13	11
d.- Gemas/ <i>Wanes</i>	49	10	24	17
e.- Anillos de crecimiento/ <i>Growth rings</i>	97	3	0	0
Criterio de clasificación/ <i>Grading criterion</i>	Porcentaje de piezas (%)/ <i>Percentage of pieces (%)</i>			
a+b+c+d+e	5	19	35	41
a+b	16	50	26	8

TABLA 3/TABLE 3

Resultados de la clasificación visual. Rendimiento (%)

Results of visual grading. Assignments (%)

Criterio Criterion	UNE 56544			DIN 4074			
	ME-1	ME-2	Rechazo <i>Rejected</i>	S13	S10	S7	Rechazo <i>Rejected</i>
Completo <i>Full</i>	9	39	52	5	19	35	41
Parcial <i>Partial</i>	17	73	10	16	50	26	8
Completo: se consideran todos los parámetros (nudos, desviación de la fibra, fendas, gemas, etc.).							
<i>Full: all parameters (knots, slope of grain, fissures, wanes and so on) considered.</i>							
Parcial: Sólo se consideran los nudos y la desviación de la fibra.							
<i>Partial: only knots and slope of grain considered.</i>							

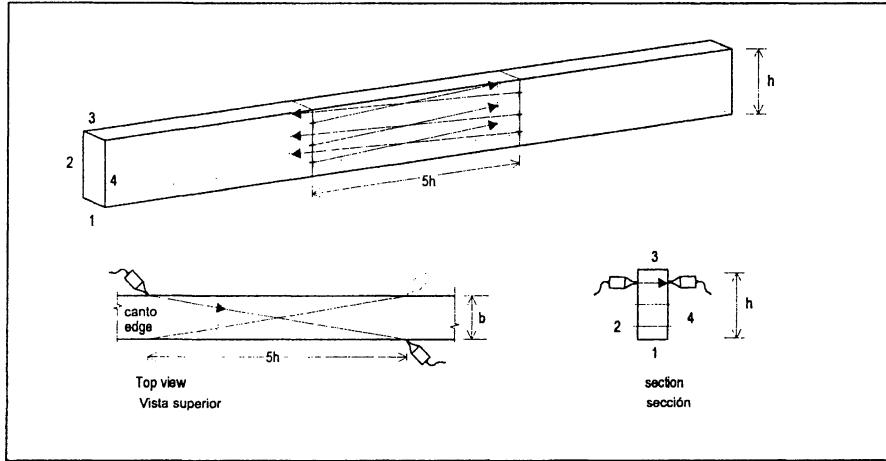


Figura 3.- Mediciones con ultrasonidos.

Figure 3.- Ultrasonic velocity measurements.

partir de los valores medios de la velocidad (13). Boström estudió y comparó cuatro métodos automáticos de clasificación por resistencia, también para abeto, incluyendo mediciones con ultrasonidos, y concluyó que la consideración de la densidad mejora la predicción del método (14). Finalmente, existen experiencias de interés en la aplicación de este método en la madera aserrada de coníferas españolas del género *Pinus* (15).

Las medidas de ultrasonidos se han efectuado en el tercio central de la longitud de la pieza, registrando 3 lecturas desde una cara, atravesando la pieza hasta la cara opuesta, y 3 más desde la otra cara (Figura 3). La distancia entre las secciones del transmisor y el receptor era igual a $5h$ (h es la altura de la sección). Esto se debe a que en esta parte de la pieza fue donde se obtenía el módulo de elasticidad en los ensayos mecánicos, y, por otra parte, en la práctica, la toma de medidas in situ no permiten, normalmente, hacerlo desde una testa a la otra, pero sí es posible de cara a cara. En este procedimiento el ángulo de la lectura respecto al eje de la pieza era del orden de los 7° .

3.4. Propiedades físicas y mecánicas

De acuerdo con la norma EN 408 (16) se obtuvieron el módulo de elasticidad, la resistencia a la flexión y la densidad. El número de piezas con ensayo válido fue de 77.

El módulo de elasticidad obtenido era el módulo local (libre del efecto del cortante). Este valor del módulo de elasticidad se obtenía aplicando la carga en dos secciones intermedias y midiendo la deformación entre dos puntos situados a una distancia igual a 5 veces la altura de la sección de la viga (Figura 4). Los valores de las propiedades físicas y mecánicas se resumen en el apartado 4 para cada calidad.

spruce. Boström concluded that including density improved the predictive power of this method (14). Finally, relevant papers have also been published on the use of this method for sawn coniferous timber from spanish *Pinus* genus (15).

A total of six ultrasonic measurements were taken in the mid third of the piece, first three from one face to the other, followed by three in the opposite direction (Figure 3). The distance between transmitter and receiver sections was $5h$, where h is the depth of the section. This procedure was followed because this was the part of the piece where the modulus of elasticity was obtained in the mechanical tests, and because in practice measurements cannot normally be taken in situ from one end of the piece to the other, whereas face to face measurements are feasible. Readings were taken at a 7° angle with respect to the centreline of the piece.

3.4. Physical and mechanical properties

Modulus of elasticity, bending strength and density values were found pursuant to European standard EN 408(16). A total of 77 pieces yielded valid test results.

The MOE obtained was the local (i.e., shear-free) modulus. This value was found by applying the load at two mid-piece sections and measuring the deflection between two points separated by a distance of 5 times the depth of the beam (Figure 4). The values of the physical and mechanical properties for each strength class are summarized in item 4 below.

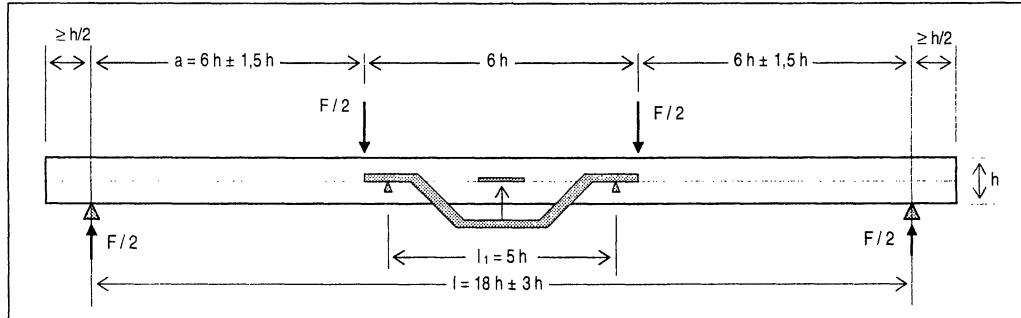


Figura 4.- Disposición para el ensayo a flexión.

Figure 4.- Bending test configuration.

TABLA 4/TABLE 4
Valores de la densidad (kg/m^3)
Density values (kg/m^3)

Especie <i>Species</i>	Mínimo <i>Minimum</i> ρ_{\min}	Media <i>Mean</i> ρ_{mean}	Caract. <i>Charact.</i> ρ_k
<i>P. sylvestris</i>	389	506	435
<i>P. pinaster</i>	434	545	473
Ambas especies <i>Both species</i>	389	515	435

TABLA 5/TABLE 5

Propiedades mecánicas asignadas a los rangos de velocidad de ultrasonidos ($f_{m,50}$: valor medio de la resistencia a flexión; $f_{m,k}$: valor característico correspondiente al 5º percentil de la resistencia a flexión; $E_{0,\text{mean}}$: valor medio del módulo de elasticidad)

Mechanical properties assigned to different ranges of ultrasonic velocity ($f_{m,50}$: mean bending strength; $f_{m,k}$: characteristic value, 5th percentile bending strength; $E_{0,\text{mean}}$: mean MOE value)

Velocidad <i>Velocity</i> (m/s)	Rendimiento <i>Assignments</i> (%)	$f_{m,50}$ (N/mm ²)	$f_{m,k}$ (N/mm ²)	$E_{0,\text{mean}}$ (N/mm ²)
≥ 4.900	38	32,5	16,6	10.150
≥ 4.100	89	28,8	13,2	9.070
< 4.100	11	23,1	13,2	7.850

4. RESULTADOS

Las propiedades mecánicas se han determinado sin diferenciar entre ambas especies (*Pinus sylvestris* L. y *Pinus pinaster* Ait.) ya que en la práctica es frecuente encontrar ambas especies mezcladas en la misma estructura (por ejemplo, las series A y E) y, por otro lado, las propiedades mecánicas de ambas especies son muy similares en las calidades bajas. Los valores de la densidad se muestran en la Tabla 4.

En la Tabla 5 se recogen las propiedades mecánicas para algunos rangos de velocidades de ultrasonidos. Los límites de la velocidad (4.900 y 4.100 m/s) corresponden claramente a diferentes valores del módulo de elasticidad (10, 9 y 7,8 kN/mm²). Como se verá más adelante, los resultados de este método no difieren significativamente de los obtenidos por la clasificación visual.

4. RESULTS

*Mechanical properties were determined without differentiating between the two species (*Pinus sylvestris* L. y *Pinus pinaster* Ait.), since in practice both are often found in the same structure (Series A and E, for instance). Moreover, the mechanical properties for the lower grades of these two species are very similar. The density values found are given in Table 4.*

Table 5 shows the mechanical properties for certain ranges of ultrasonic velocity. The two limiting values (4,900 and 4,100 m/s) clearly correspond to different modulus of elasticity values (10, 9 and 7.8 kN/mm²). As discussed below, the results obtained with this method do not differ significantly from those found by visual grading.

TABLA 6/TABLE 6

Propiedades mecánicas para las calidades visuales ($f_{m,50}$: valor medio de la resistencia a flexión; $f_{m,k}$: valor característico correspondiente al 5º percentil de la resistencia a flexión; $E_{0,mean}$: valor medio del módulo de elasticidad)
Values of mechanical properties found for visual grades ($f_{m,50}$: mean bending strength; $f_{m,k}$: characteristic value, 5th percentile bending strength; $E_{0,mean}$: mean MOE value)

UNE 56544				DIN 4074			
Calidad <i>Grade</i>	$f_{m,50}$ (N/mm ²)	$f_{m,k}$ (N/mm ²)	$E_{0,mean}$ (N/mm ²)	Calidad <i>Grade</i>	$f_{m,50}$ (N/mm ²)	$f_{m,k}$ (N/mm ²)	$E_{0,mean}$ (N/mm ²)
ME1	30,7	16,8	9.058	S13	32,5	17,8	9.220
ME2	26,2	13,4	9.166	S10	30,1	16,8	9.080
				S7	23,8	9,6	9.060
ME1+ME2	27,1	13,8	9.145	S13+S10+S7	28,8	13,3	9.110
Rechazo <i>Rejected</i>	20,7	10,3	7.018	Rechazo <i>Rejected</i>	20,6	11,6	6.823

TABLA 7/TABLE 7

Propiedades mecánicas asignadas a las calidades visuales incluyendo la velocidad de ultrasonidos

Values of mechanical properties found by visual grading and ultrasonic velocity

	Calidad <i>Grade</i>	Velocidad <i>Velocity</i> (m/s)	Rendimiento <i>Assignments</i> (%)	$f_{m,50}$ (N/mm ²)	$f_{m,k}$ (N/mm ²)	$E_{0,mean}$ (N/mm ²)
UNE 56544	ME1+ME2	≥ 4.900	38	30,4	16,3	10.152
	ME1+ME2	< 4.900	52	24,7	13,4	8.411
	Rechazo <i>Rejected</i>	-	10	20,7	10,3	7.018
DIN 4074	S13+S10+S7	≥ 4.900	38	32,0	17,4	10.152
	S13+S10+S7	< 4.900	55	26,0	15,4	8.376
	Rechazo <i>Rejected</i>	-	7	20,6	11,6	6.823

En la Tabla 6 se recogen las propiedades mecánicas para las calidades visuales. Estos valores se obtuvieron considerando el criterio parcial para la clasificación (nudos y desviación de la fibra). El módulo de elasticidad deducido para las diversas calidades resulta muy similar en ambas normas (UNE y DIN). Por este motivo se propone reunir todas las piezas en una única calidad (ME1+ME2 o S13+S10+S7). Este grupo tiene un módulo de elasticidad de 9 kN/mm² y un valor característico de la resistencia a flexión de 14 N/mm², aproximadamente. Los resultados son muy similares en ambas normas (ligeramente superiores en resistencia para la norma UNE) pero el proceso de medición de los nudos en la norma DIN es más sencillo que en la norma UNE.

Finalmente, se propone incluir la velocidad de propagación de los ultrasonidos como un parámetro añadido a la clasificación visual. En este sentido, las piezas clasificadas visualmente que tengan una velocidad igual o mayor que 4.900 m/s pueden alcanzar una clase resistente superior, Tabla 7, con una resistencia característica a flexión de 16 a 17 N/mm² y el módulo de elasticidad de 10 kN/mm².

Table 6 shows the values of the mechanical properties for the different visual grades obtained with the partial criterion for grading pieces (knots and slope of grain). The MOE values found were very similar for all the grades defined in the two standards (UNE and DIN). In light of this finding, a proposal is formulated to group all the pieces in a single grade (ME1+ME2 or S13+S10+S7) with a MOE of 9 kN/mm² and a characteristic bending strength of approximately 14 N/mm². The results were very similar in the two standards (with slightly higher strength values in the UNE standard), although the DIN standard describes a simpler knot measurement technique.

The proposal also includes using ultrasonic velocity as a parameter in addition to visual grading. In this regard, visually graded pieces with a velocity greater than or equal to 4,900 m/s would be graded in a next higher strength class (Table 7), with a characteristic bending strength of from 16 to 17 N/mm² and a MOE of 10 kN/mm².

5. CONCLUSIONES

La clase resistente asignada de acuerdo con la norma EN 338 es función del valor característico de la resistencia a flexión (MOR), del valor medio del módulo de elasticidad y del valor característico de la densidad. El factor más restrictivo es el MOR, que limita la clase resistente apenas a una C14; ello limitaría el módulo de elasticidad a 7 kN/mm^2 , mientras que los módulos de elasticidad obtenidos son de 9 a 10 kN/mm^2 . En piezas que trabajan a flexión, como las viguetas de forjado y las vigas, el parámetro más relevante en el cálculo es la limitación de la deformación y ésta depende del módulo de elasticidad. Por esta razón, las clases resistentes propuestas se dividen en tres parámetros (Resistencia, Rígidez y Densidad); de esta forma no hay pérdida de propiedades mecánicas.

En la Tabla 8 se resume la propuesta para la asignación de las propiedades mecánicas en estructuras de madera existentes de gruesa sección de madera de coníferas en España. Se establece un único grado de calidad visual para la norma UNE 56544, ME1+ME2, correspondiente a una clase resistente con un valor característico de la resistencia a flexión de 14 N/mm^2 (F14), un valor medio del módulo de elasticidad de 9 kN/mm^2 (E9) y un valor característico de la densidad de 380 kg/m^3 (D380). Además, si la madera presenta una velocidad de trasmisión de ultrasonidos igual o superior a 4.900 m/s sería posible considerar una clase resistente superior, F16/E10/D380. Para la norma DIN 4074 se obtienen resultados similares.

El valor característico de la densidad permitiría asignar la madera a una clase resistente C40 de acuerdo con la norma EN 338. Incluso, considerando el valor mínimo (389 kg/m^3) podría asignarse a la clase resistente C30. Esto representa una ventaja para la determinación de la resistencia al aplastamiento en el cálculo de uniones y en la resistencia a la compresión perpendicular a la fibra.

En general, la madera estructural utilizada en las edificaciones antiguas no había sido clasificada, y la variabilidad de la calidad conduce a un reducido valor característico para la resistencia a flexión. El valor medio del mó-

5. CONCLUSIONS

The strength class assigned pursuant to european standard EN 338 depends on the characteristic value of bending strength or modulus of rupture (MOR), the mean MOE and characteristic density. In this case, the most restrictive factor is MOR, according to which the strength class for pieces such as those studied would be a mere C14; the MOE for that class is 7 kN/mm^2 , whereas the modulus of elasticity obtained in this exercise ranged from 9 to 10 kN/mm^2 . Be it said that in pieces subjected to bending stress such as floor joists and beams, the most relevant parameter in the calculation is maximum deflection, which depends on MOE. For these reasons, the strength classes proposed are defined by three parameters (strength, stiffness and density) to ensure that none of the mechanical properties is reduced for adjustment to an established strength class.

Table 8 summarizes the proposed mechanical property requirements for large cross sections of coniferous timber in existing buildings in Spain. A single visual grade is established for spanish standard UNE 56544, namely ME1+ME2, which corresponds to a strength class with a characteristic bending strength value of 14 N/mm^2 (F14), a mean MOE of 9 kN/mm^2 (E9) and a characteristic density of 380 kg/m^3 (D380). In addition, visual stress graded timber with an ultrasonic velocity greater than or equal to $4,900 \text{ m/s}$ could be assigned to a higher strength class, F16/E10/D380. Similar results were obtained for standard DIN 4074.

Based on its characteristic density value, the timber studied here could be assigned to strength class C40, pursuant to standard EN 338. Even if the minimum value found (389 kg/m^3) were used, it could be assigned to class C30. This is an advantage for determining the embedment strength when calculating joints and compressive strength perpendicular to the grain.

Structural timber in historic buildings has not usually been graded and the grading variability has led to low characteristic bending strength values. The mean MOE value found for aged timber is reasonable and the

TABLA 8/TABLE 8
Propuesta de clases resistentes
Proposed strength classes

Calidad visual <i>Visual grade</i>	Clase resistente <i>Strength class</i>	Rendimiento <i>Assignments (%)</i>	Requisito añadido de velocidad (m/s) <i>Additional velocity requirement (m/s)</i>	Clase resistente <i>Strength class</i>	Rendimiento <i>Assignments (%)</i>
ME1+ME2	F14/E9/D380	90	≥ 4.900	F16/E10/D380	38
S13+S10+S7	F13/E9/D380	97	≥ 4.900	F17/E10/D380	38

dulo de elasticidad es un valor normal y aceptable, y la densidad característica es un valor muy elevado comparado con los asignados a través del sistema de clases resistentes de la norma EN 338.

AGRADECIMIENTOS

Al Ministerio de Ciencia y Tecnología (Plan Nacional I+D+I 2000-2003. Proy.: AGL2002-00813). AITIM. CIFOR-INIA, Universidad Politécnica de Madrid (ETSIM). Universidad de Valladolid.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) EN 338: *Structural timber: Strength classes* (1999).
- (2) Fernández-Golfin Seco, J. I., Díez Barra, M. R.: *Caracterización mecánica de la madera aserrada de uso estructural clasificada visualmente de acuerdo con la norma UNE 56.544*. Mater Construcc, Vol. 48, nº 252 (1998), pp.45-59.
- (3) Fernández-Golfin Seco, J. I., Díez Barra, M. R., Gutiérrez Oliva, A.: *Caracterización mecánica de la madera aserrada de pino silvestre de los sistemas Central e Ibérico mediante probetas de tamaño estructural*. Revista de Investigación Agraria 6 (1y2), (1997), pp.183-215.
- (4) Fernández-Golfin Seco, J.I., Díez Barra, M.R., Baonza Merino, M. V., Gutierrez Oliva, A., Prieto Hermoso, E., Conde García, M., Van den Eynde, V.: *Caracterización de la calidad y las propiedades de la madera de pino laricio (Pinus nigra)*. Rev. de Investigación Agraria: 10(2) (2001), pp. 311-332.
- (5) Hermoso, E., Fdez-Golfin J.I., Díez M. R.: *Madera estructural de pino silvestre: Caracterizacion Mecanica*. Rev. de Investigación Agraria: 11(2) (2002), pp. 425-440.
- (6) UNE 56544: *Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas (Visual grading of sawn timber for structural use. Coniferous)* (2003).
- (7) DIN 4074: *Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit. Teil 1: Nadelholz* (Strength grading of wood. Part 1: coniferous sawn timber) (2003).
- (8) Arriaga, F., Garcia, L., Gebremedhin, K. G., Peraza, F.: *Grading and Load Carrying Capacity of Old Timber Beams*. AITIM, nº 161 (1992), pp. 51-62.
- (9) Pedrotti, P., Paganini, F., del Senno, M.: *Longitudinal boring of beams*. Xylon International, jul.-aug. (2000), pp. 72-75.
- (10) Ross, R. J., Hunt, M. O.: *Stress wave timing non-destructive evaluation tools for inspecting historic structures. A guide for use and interpretation*. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-119. Madison, WI: US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory (2000), pp. 15.
- (11) Wang, X., Ross, R. J., Mattson, J. A., Erickson, J. R., Forsman, J. W., Geske, E. A., Wehr, M. A.: *Several non-destructive evaluation techniques for assessing stiffness and moe of small-diameter logs*. Res. Paper FPL-RP-600. Madison, WI: US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory (2001), pp. 12.
- (12) Bekhta, P., Niemz, P., Kucera, L.: *The study of sound propagation in the wood-based composite materials*. 12th International Symposium on Non-Destructive Testing of Wood (2000), pp. 33-42.
- (13) Sandoz, J. L.: *Grading of construction timber by ultrasound*. Wood Science and Technology, 2 (1989), pp. 95-108.
- (14) Böstrom, L.: *Machine strength grading: comparison of four different systems*. Swedish National Testing and Research Institute, Building Technology SP Report 49 (1994), pp. 57.
- (15) Hermoso Prieto, E.; Fernández-Golfin Seco, J. I., Díez Barra, M. R.: *Evaluación de la clasificación resistente de la madera estructural mediante ultrasonidos*. 10º Congreso Nacional END. Asociación Española de Ensayos No Destructivos. Cartagena (2003), pp. 18-20.
- (16) EN 408.: *Timber structures. Sawn timber and glued laminated timber for structural use. Determination of some physical and mechanical properties* (1999).

characteristic density is high compared to the values defined under the strength class system set out in European standard EN 338.

ACKNOWLEDGEMENTS

Ministry of Science and Technology (National R&D+i Plan 2000-2003. Proj. AGL2002-00813). AITIM. CIFOR-INIA, Polytechnic University of Madrid (School of Forestry). University of Valladolid.