

Caracterización mecánica de tablas de madera de pino silvestre, usadas como barandillas en Sistemas Provisionales de Protección de Borde

Castaño Cabañas, A.

Arquitecto Técnico
Dpto. Expresión Gráfica aplic.
a la Edificación, UPM
angel.castano@upm.es

Cobo Escamilla, A.¹

Dr. Ingeniero Industrial
Dpto. Tecnología de la
Edificación, UPM
alfonso.cobo@upm.es

González García, M^a. N.¹

Dra. Por la UPM
Dpto. Const. Arquitectónicas
y su Control, UPM
mariadelasnieves.gonzalez@upm.es

Llauradó Pérez, N.

Arquitecto Técnico
Dpto. Expresión Gráfica aplic.
a la Edificación, UPM
nuria.llaurado@upm.es

RESUMEN

El empleo de piezas de madera de pino silvestre de pequeña escuadría es una práctica muy habitual en el sector de la Construcción en la zona central de la Península Ibérica.

Existen numerosos estudios sobre este tipo de material pero todos ellos se han realizado sobre piezas de gran escuadría. No obstante, se constata un vacío absoluto de informes técnicos en lo que se refiere al comportamiento mecánico de elementos de pequeña escuadría, que son los que normalmente se utilizan en protecciones colectivas (PC) y medios auxiliares de edificación (MAE).

La norma UNE-EN 13374 “Sistemas provisionales de protección de borde. Especificaciones del producto, métodos de ensayo” especifica que la madera empleada en sistemas provisionales de protección de borde debe poseer como mínimo la clase resistente C14. La obtención de la clase resistente de la madera empleada en construcción para PC y MAE mediante el empleo de la norma UNE 56544 “Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Maderas de coníferas”, dejaría fuera de uso prácticamente a todos los elementos empleados en la práctica, que suelen ser de madera de cuarta, a la que no se le puede asignar una clase resistente y además la norma supone que su resistencia es inferior a la de la clase C18 en elementos de pino silvestre.

En este trabajo se ha realizado una caracterización mecánica de tablas de madera de pino silvestre de las diferentes calidades que existen en el mercado (especial, primera, segunda, tercera y cuarta) en los grosores comerciales 22, 27, 30 y 40 mm y ancho 150 mm., que son los utilizados habitualmente en (PC) y (MAE).

En todos los elementos se ha realizado una clasificación visual y resistente previa según la norma UNE 56544. Posteriormente se han ensayado las piezas para determinar sus características mecánicas reales. Se han comparado los resultados con los obtenidos por otros investigadores sobre piezas de gran escuadría, buscando las posibles correlaciones entre algunas de sus propiedades.

¹ Grupo de Investigación Universidad Politécnica de Madrid. Patología de Estructuras, Protecciones Colectivas y Medios Auxiliares de Edificación.

ABSTRACT

The use of small scantling timber pieces is a common practice in the building industry in the central areas of the Iberian Peninsula.

There is a consistent number of studies on this type of material, and all of them have been carried out on large scantling elements; however, there is a total lack of technical reports as regards the mechanical properties of small scantling elements, which are often used in collective protection systems (PC) and in building auxiliary means (MAE).

EN-ISO 13374 on “Edge protection provisional systems, product specifications, testing methods” specifies that timber used in edge protection provisional systems must be at least up to Resistance Type 14. Granting the stamp of Resistance Type to timber to be used in collective protection systems and in building auxiliary means by calling on EN-ISO 56544 “Visual grading of lumber for structural use. Softwoods” would restrict the use of almost all elements employed in everyday practice. These elements are often graded as quality 4, and thus they cannot be classified as “resistant”. Additionally, the norm establishes that their resistance is lower than standard 18 in red deal elements. A classification of the mechanical properties observed in red deal planks of various standards (special, first, second, third and fourth) has been conducted in this study. To that end, elements having thickness standards 22, 27, 30 and 40 mm, and those having width standard 150mm have been considered, since these are the ones commonly built into collective protection systems and into building auxiliary means.

In all the cases, a preliminary classification of the visual and resistant properties of these elements has been made in pursuance to EN-ISO 56544. Then, all the pieces have been tested so as to determine their actual mechanical properties. Finally, results obtained from the analysis have been compared with those from similar tests conducted on large scantling pieces in order to draw up some relevant correlations derived from their properties and behaviour.

Palabras clave – Barandillas, Seguridad, Construcción, Clasificación Visual, Madera.

Keywords – Guardrails, Safety, Construction, Visual Grading, Timber.

1. Introducción

En un breve análisis de los datos estadísticos relativos a la siniestralidad laboral, se puede constatar rápidamente la importancia significativa que tienen los accidentes producidos por caídas en altura, llegando a constituir, en el sector de la construcción, más de la tercera parte de los accidentes mortales y ocupando el primer lugar en lo que se refiere a los riesgos de accidente identificados, con un 59,3 %.

Todas las tendencias en materia de seguridad y prevención apuntan hacia la prevención como el principio básico más eficaz para la reducción de la siniestralidad y consideran prioritaria la implementación de protecciones colectivas frente a las personales, por tanto, los sistemas provisionales de protección de borde SPPB, se manifiestan como uno de los mejores aliados frente a este problema.

En la Península Ibérica, es muy habitual el empleo de la madera como parte integrante de estos sistemas y en medios auxiliares de edificación, siendo la madera de pino silvestre la más utilizada en la zona centro.

El articulado de la normativa vigente se encuentra repleto de expresiones poco rigurosas tales como: adecuados, sólidos y estables, suficientemente resistentes, cuando hace referencia al comportamiento mecánico de los elementos de seguridad y sus componentes.

La norma UNE-EN 13374 “Sistemas provisionales de protección de borde. Especificaciones del producto, métodos de ensayo” especifica que la madera empleada en sistemas provisionales de protección de borde debe poseer como mínimo la clase resistente C14. La obtención de la clase resistente de la madera empleada en construcción para PC y MAE mediante el empleo de la norma UNE 56544 “Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Maderas de coníferas” dejaría fuera de uso prácticamente a todos los elementos empleados en la práctica, que suelen ser de madera de cuarta, a la que no se le puede asignar una clase resistente y además la norma supone que su resistencia es inferior a la de la clase C18 en elementos de pino silvestre.

Existe abundante información acerca del comportamiento estructural de la madera aserrada de gran escuadría de pino silvestre (Arriaga et al., 2005; Hermoso et al., 2002). Este extremo se explica dada la extendida utilización de la madera en elementos estructurales de edificación. Sin embargo, no se ha encontrado documentación relativa al comportamiento de elementos de pequeña escuadría, que son los que habitualmente se utilizan en SPPB.

El principal objetivo de este trabajo consiste en la caracterización de tablas de madera de pino silvestre de las diferentes calidades que existen en el mercado (especial, primera, segunda, tercera y cuarta) en los grosores comerciales 22, 27, 30 y 40 mm y ancho 150 mm. Que son los utilizados habitualmente en (PC) y (MAE).

En todos los elementos se ha realizado una clasificación visual y resistente previa según la norma UNE 56544. Posteriormente se han ensayado las piezas para determinar sus características mecánicas reales. Se han comparado los resultados con los obtenidos por otros investigadores sobre piezas de gran escuadría, buscando las posibles correlaciones entre algunas de sus propiedades a fin de poder predecir algunas de sus propiedades a través del conocimiento de otras que pueden ser obtenidas por métodos no destructivos.

2. Materiales y técnicas empleadas

2.1 Materiales empleados

Para la evaluación del comportamiento de la madera en este trabajo, se han utilizado tablas de madera de pino silvestre (PNSY), *Pinus Sylvestris* L, variedad ibérica Svob (Hermoso 2001), procedentes del Sistema Central, Sierra de Guadarrama, suministradas por el Aserradero de Maderas “El Espinar”, situado en Segovia. Esta madera corresponde a poblaciones de alta calidad.

Este aserradero clasifica las tablas de maderas en tres categorías comerciales en función de las caras y cantos de la tabla libres de defectos:

Clase “Como Cae” (CC). Engloba tablas de calidad especial, primera o Segunda, recogidas en la norma UNE-EN 1611 (UNE-EN 1611-1, 2000) y presentan las dos caras y un canto libres de defectos.

Clase Tercera (TA). Presentan una cara libre de defectos.

Clase Cuarta (CA). Se permite cualquier tipo de defectos. Es la madera que usualmente se solicita al aserradero para su uso en construcción.

Se ha trabajado sobre tablas de madera, de categorías CC, TA y CA, de dimensiones aproximadas 1600 x 150 mm. Y espesores 22, 27, 30 y 40 mm.

2.2 Técnicas empleadas

2.2.1 Técnicas de caracterización del material

Las técnicas experimentales han tomado como punto de partida la caracterización del material que se ha realizado tanto por técnicas visuales como por ensayos mecánicos de caracterización. Posteriormente los elementos se han ensayado de forma individual, bajo cargas estáticas.

2.2.2 Técnicas visuales

Las técnicas visuales para caracterizar la madera estructural son el sistema más antiguo y extendido. Las técnicas visuales se utilizan habitualmente para clasificar la madera en aserradero. Se basan en la inspección y valoración de las singularidades presentes en la madera, que pueden cuantificarse de forma visual y en su asignación al sistema de clases de calidad nacional (Hermoso, 2001b). En la mayoría de las ocasiones sólo precisa un flexómetro o regla.

En función de las especificaciones observadas para los parámetros objeto de valoración, se pueden definir distintas calidades de madera para cada especie estudiada. Cada país ha desarrollado sus correspondientes criterios que se han recogido en sus propias normas de clasificación visual, adaptándose a las especies más frecuentes en su territorio.

La norma UNE-EN 338: 2010 (UNE-EN 338, 2010), establece un sistema de clases resistentes de uso general en el marco de las normas de cálculo estructural. Indica para cada clase los valores característicos de las propiedades de resistencia y rigidez y los valores de densidad.

2.2.3 Ensayos de caracterización del material

En Europa, los ensayos para determinar las propiedades mecánicas de la madera se realizan de acuerdo con la norma UNE-EN 408: 2004 (UNE-EN 408, 2004). Los valores característicos de las propiedades mecánicas que se obtienen para la calidad, quedan asignados en un sistema de clases resistentes definidos en la norma UNE-EN 338: 2010.

Una vez obtenidos los valores de tensión de rotura a flexión, $f_{m,k}$; módulo de elasticidad longitudinal medio, $E_{0,medio}$; y densidad, ρ_k , y utilizando las expresiones contenidas en la norma UNE-EN 338: 2010, o directamente los valores característicos de la tabla 1 de la misma norma, pueden obtenerse los valores correspondientes a las siguientes características: tracción paralela a la fibra, $f_{t,0,k}$; tracción perpendicular a la fibra, $f_{t,90,k}$; compresión paralela a la fibra, $f_{c,0,k}$; compresión perpendicular a la fibra, $f_{c,90,k}$; cortante, $f_{v,k}$; módulo de elasticidad paralela a la fibra (5º percentil), $E_{0,05}$; módulo de elasticidad medio perpendicular a la fibra, $E_{90,medio}$; módulo medio cortante, G_{medio} ; y densidad media, ρ_{medio} .

Un requisito inicial para poder usar la madera en aplicaciones donde deba soportar cargas, es conocer sus condiciones de resistencia y rigidez. La norma UNE-EN 408: 2004 no es de aplicación para piezas de tan pequeña escuadría como las que forman parte de los SPPB, que carecen de la consideración de estructurales, por lo que la obtención de las propiedades mecánicas de la madera no se ha realizado siguiendo estrictamente la norma anterior, sino que se ha optado por introducir ciertas modificaciones. En concreto cuando los ensayos de flexión se han realizado cargando en dos puntos, la distancia entre puntos de aplicación de las cargas ha sido el tercio de la luz en vez de separarlos 18 veces el canto de la pieza ya que de aplicarse este valor, el valor tan pequeño del canto (2-4 cm.) daría como resultado una dimensión de separación tan reducida que el resultado real sería comparable a la aplicación de una sola carga en el centro del vano.

La obtención del módulo de elasticidad longitudinal de las tablas se ha realizado con una media global, utilizando la flecha en el centro de la viga con relación a los puntos de apoyo, de manera similar a los métodos empleados en USA y Australia (Broström, 1999).

Se ha despreciado el efecto de las deformaciones provocadas por la sollicitación cortante en el valor de las flechas finales debido a las reducidas dimensiones de la sección de las tablas utilizadas en este estudio.

2.2.4 Técnicas estadísticas. Regresión

En general se trata de comprobar el comportamiento como predictores de las propiedades mecánicas de la madera, básicamente tensión de rotura y módulo de elasticidad, de algunas variables pertenecientes al conjunto de parámetros para la clasificación visual, de algunas características físicas y mecánicas obtenidas por ensayos en la madera.

Dicho comportamiento se analiza mediante regresiones lineales simples entre variables y la comparación de los coeficientes de determinación (R^2) para las diferentes variables en los distintos grupos de datos.

Con los resultados obtenidos en la caracterización experimental, se han buscado correlaciones significativas a efectos de construir modelos de predicción entre las variables.

3. Trabajo experimental realizado

3.1 Técnicas visuales

Todas las tablas de madera se han clasificado visualmente utilizando la norma UNE 56544: 2007 (UNE 56544, 2007), que establece un sistema de clasificación visual aplicable a la madera aserrada de sección rectangular de las principales especies de coníferas españolas. Esta norma establece dos calidades visuales: ME-1 y ME-2. En su Anexo A, se asignan clases resistentes en función de la especie y calidad de la madera aserrada de sección rectangular de espesor menor o igual a 70 mm. Se han medido y observado los siguientes defectos: nudos, bolsas de resina y entrecasco, fendas, desviación de fibra, gemas, deformaciones de la madera (curvaturas y alabeos). En función de los defectos existentes, la madera ha sido clasificada en clases resistentes C27, C18 o rechazo R. La letra C hace referencia al género: Coníferas y el número indica el valor mínimo de la resistencia a flexión de esa clase, en N/mm^2 .

3.2 Ensayos de caracterización del material

La caracterización mecánica del material se ha realizado en el Laboratorio de Materiales de Construcción de la Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica de la Universidad Politécnica de Madrid. En primer lugar se han determinado las dimensiones y el peso de todas las piezas, realizándose posteriormente los siguientes ensayos.

3.2.1 Módulo de elasticidad longitudinal

El módulo de elasticidad longitudinal, $E_{0,medio}$, se ha obtenido colocando las tablas biapoyadas, cargándolas y midiendo los desplazamientos producidos. El valor del módulo de elasticidad, se ha obtenido aproximadamente en el intervalo de cargas $0,15 F_{m\acute{a}x}$ y $0,35 F_{m\acute{a}x}$, siendo $F_{m\acute{a}x}$ la carga estimada de rotura.

La materialización del ensayo se ha realizado de dos formas: Colocando las tablas sobre apoyos indeformables, cargándolas con prismas de acero de peso conocido y midiendo los desplazamientos con un Flexímetro de la marca Saimoiragui; y a partir del diagrama de carga- desplazamiento, obtenido durante el ensayo de tensión de rotura que se describe a continuación.

3.2.2 Tensión de rotura a flexión

La Tensión de rotura a flexión, $f_{m,k}$, se ha obtenido sometiendo las tablas a carga creciente en los dos tercios de la luz o en el punto medio hasta rotura. Se ha empleado una máquina de ensayos universal, marca IBERTEST, modelo MIB-60/AM, que utiliza el software Wintest 32.

3.2.3 Densidad

La densidad, ρ_k , se ha obtenido a partir de probetas extraídas de las tablas ensayadas. Se han cubicado y pesado en una balanza electrónica GIBERTINI, modelo Europe 6000, con una capacidad de carga de 3300 g y precisión 0.01g. Sus dimensiones son de 210x355x120 mm, con un diámetro de plato de 190 mm.

3.2.4 Contenido de humedad

Posteriormente se han secado a $103 \pm 2^\circ \text{C}$ hasta peso constante, para determinar el contenido de humedad según norma UNE-EN 384: 2004 (UNE-EN 384, 2004), en estufa de convección natural para desecación y esterilización de la marca CONTERM, modelo 2000201, con capacidad de 50x60x50 cm y regulación de temperaturas entre 40 y 250°C .

3.3 Análisis de regresión

Inicialmente se ha realizado un análisis previo de regresión múltiple para poder elegir las variables más explicativas de la variabilidad de la Tensión de Rotura a Flexión. De este análisis previo se ha optado por correlacionar (σ_t/E , σ_t/E_{MAX} y σ_t/ρ).

A la vista de la escasa correlación que existe entre los distintos parámetros, cuando se contemplan todas las tablas en su conjunto, hemos optado por desagregar los datos por espesores clases resistentes y por grosores (22, 27, 30 y 40 mm.)

4. Resultados obtenidos

4.1 Caracterización del material

4.1.1 Caracterización visual

Los resultados obtenidos después de realizar la clasificación visual, según UNE 56544 (UNE 56544, 2007) muestran que el 33,3% corresponde a la clasificación ME-1, el 16,3 % corresponde a la clasificación ME-2 y el 50,4 %, son clasificadas como Rechazo.

Por tanto, de dichos datos se puede concluir que el porcentaje de madera clasificada para el total de la muestra (ME-1+ME-2) supone un 49,6%, mientras que los rechazos alcanzan el 50,4%, valor que se sitúa muy por encima de la media de la especie.

El valor de rechazos en la clasificación visual del pino silvestre en los entornos del 23% se encuentra entre los más bajos de las coníferas españolas (Fernández-Golfín *et al.*, 2000).

4.1.2 Caracterización mecánica

Se han realizado cuadros resumen (Tablas 1 y 2) en los que se indican los valores medios de las propiedades más representativas de todas las piezas obtenidas en el ensayo de flexión: la carga máxima de ensayo (P_{\max}), la flecha en el periodo lineal (f_e), la flecha máxima alcanzada, (f_{\max}), la tensión de rotura calculada en la sección donde el momento flector es máximo ($\sigma_{\max 1}$), la tensión de rotura calculada en la sección donde se produce el fallo, ($\sigma_{\max 2}$), el módulo de elasticidad longitudinal (E), la energía almacenada en el ensayo a flexión, por la estructura en régimen lineal (E_e) y la máxima energía almacenada en el ensayo a flexión, por toda la estructura (E_{\max}).

La densidad ρ_k , se ha obtenido desecando las muestras y haciendo la corrección para un 12% de humedad.

En la tabla siguiente (Tabla 1) aparecen los valores medios de los resultados desagregados de acuerdo a las distintas clases visuales y su asignación a clases resistentes según el Anexo A de la Norma UNE 56544.

UNE 56544	Nº tablas %	UNE 56544 Anexo A	ρ gr/cm ³	ρ al 12% UNE-EN 338	P_{\max} kN	f_e mm	f_{\max} mm	$\sigma_{\max 1}$ N/mm ²	$\sigma_{\max 2}$ N/mm ²	E N/mm ²	E_e N.mm	E_{\max} N.mm
ME-1	33,3	C27	0,44	0,42	5,66	32,5	71,0	71,7	70,8	9896,7	55344,1	240998
ME-2	16,3	C18	0,44	0,47	4,44	32,1	59,6	71,4	69,9	10663,6	52378,9	169773
R	50,4		0,44	0,47	3,86	28,1	51,5	54,7	49,1	9154,6	39855,7	125441

Tabla 1. Caracterización mecánica (valores medios) según clase visual asignada por UNE 56544.

Posteriormente, se han desagregado los valores atendiendo a los grosores comerciales utilizados, (Tabla 2).

Grosor Tabla	Nº Tablas %	ρ gr/cm ³	ρ al 12% UNE-EN 338	P_{\max} kN	f_e mm	f_{\max} mm	$\sigma_{\max 1}$ N/mm ²	$\sigma_{\max 2}$ N/mm ²	E N/mm ²	E_e N.mm	E_{\max} N.mm
22	22,96	0,39	0,42	3,45	34,32	75,06	59,13	57,17	10214,5	43178,1	190794
27	65,93	0,45	0,47	4,41	31,65	56,15	67,34	62,93	9372,3	51815,6	151690
30	5,93	0,43	0,45	7,01	15,19	50,09	53,99	53,98	12108,5	28047,6	245375
40	5,18	0,42	0,44	8,48	11,8	40,81	36,71	36,71	7786,6	26707	247414

Tabla 2. Caracterización mecánica (valores medios) según grosor de tabla.

Para comparar los resultados obtenidos con los que hace corresponder la Norma UNE-EN 388, se transcribe la Tabla 1. de la Norma para coníferas y chopo, (Tabla 3).

CLASE RESISTENTE		C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
Valores de resistencia en N/mm ²													
Flexión	$f_{m,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50
Tracción	$f_{t0,k}$	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30
Tracción ⊥	$f_{t90,k}$	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Compresión	$f_{c0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29
Compresión ⊥	$f_{c90,k}$	2.0	2.2	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.1	3.2
Cortante	f_v,k	3.0	3.2	3.4	3.6	3.8	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
Valores de rigidez en N/mm ²													
Módulo de elasticidad, valor medio	E_0 , medio	7000	8000	9000	9500	10000	11000	11500	12000	13000	14000	15000	16000
Módulo de elasticidad , valor percentil 5	$E_{0,05}$	4700	5400	6000	6400	6700	7400	7700	8000	8700	9400	10000	10700
Módulo de elasticidad ⊥, valor medio	$E_{90,05}$	230	270	300	320	330	370	380	400	430	470	500	530
Módulo de cortante, valor medio	G , medio	440	500	560	590	630	690	720	750	810	880	940	1000
Densidad de masa en kg/m ³													
Densidad de masa, valor medio	ρ , medio	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550

Tabla 3. Madera estructural. Clases resistentes y valores característicos según la Tabla 1. de la Norma UNE-EN 388 para coníferas y chopo.

Las resistencias características a flexión y a tracción paralelas, recogidas en las tablas de las clases resistentes de la norma UNE-EN 338, hacen referencia a piezas con un valor de canto de 150 mm., y por tanto, para ser comparativas se debería realizar una corrección dividiendo por el factor de altura K_h según la ecuación 1.

$$K_h = \left(\frac{150}{h} \right)^{0,2} \quad (1)$$

Siendo h la altura de la sección expresada en mm.

En este trabajo no se ha aplicado la corrección por altura, ya que interesa conocer la resistencia “real” de las piezas, a través de la tensión de rotura de cada pieza obtenido mediante ensayo, más que su preciso encaje en el sistema definido en la norma.

El 100% de las piezas ensayadas superan los valores de referencia de resistencia a flexión (MOR) de la Norma, incluso si son corregidos por altura. Con un rendimiento del 100% en la clasificación de las piezas.

El módulo de elasticidad (MOE) es superado por el 71% en las ME-1, por el 23% en las ME-2, y por el 10% en las R.

La densidad de referencia es superada por el 53% de las maderas clasificadas ME-1 y por el 100% en ME-2 y R.

4.1.3 Análisis de regresión

En la siguiente tabla (Tabla 4) se reflejan los resultados del coeficiente de determinación R^2 (porcentaje que el modelo explica de la variabilidad en la Tensión de Rotura a Flexión) así como la ecuación del modelo ajustado, recta que relaciona ambas magnitudes y que permite, en consecuencia, predecir la Tensión de Rotura a Flexión a partir del conocimiento del Módulo de Elasticidad.

De igual modo se ha establecido el nivel de correlación entre la Tensión de Rotura a Flexión y la Energía Máxima Absorbida en el ensayo de rotura.

Se observa que los valores que muestran una correlación relativamente fuerte entre las variables estudiadas, se obtienen con las piezas de mayor grosor (27, 30 y 40 mm.), las piezas de 22 mm. de espesor muestran una correlación débil o muy débil entre todos los parámetros comparados. (Tabla 4)

En la siguiente tabla, se muestran los resultados cuando se desagregan los datos atendiendo a la calidad comercial y en este caso, se ha realizado también un análisis de regresión simple utilizando la Tensión de Rotura a Flexión como variable dependiente y la Densidad como variable independiente. (Tabla 5)

GR.	C.V.	PARÁMETROS	R ²	RECTA DE REGRESIÓN
22	TODAS	σ_r/E	11,80% *	$\sigma_r = 39,1314 + 0,00176638 \times E$
		σ_r/E_{MAX}	13,46% **	$\sigma_r = 48,5926 + 0,0000449783 \times E_{MAX}$
	ME-1	σ_r/E	0,87% *	$\sigma_r = 62,3304 + 0,000217088 \times E$
		σ_r/E_{MAX}	5,38% **	$\sigma_r = 69,3589 - 0,0000215063 \times E_{MAX}$
	ME-2	σ_r/E	28,70% *	$\sigma_r = 36,1837 + 0,00230187 \times E$
		σ_r/E_{MAX}	17,38% *	$\sigma_r = 54,7855 + 0,000033112 \times E_{MAX}$
	R	σ_r/E	26,18% *	$\sigma_r = 16,2125 + 0,00344778 \times E$
		σ_r/E_{MAX}	17,50% *	$\sigma_r = 41,726 + 0,0000520115 \times E_{MAX}$
27	TODAS	σ_r/E	50,46% ***	$\sigma_r = -6,84318 + 0,00746559 \times E$
		σ_r/E_{MAX}	68,91% ***	$\sigma_r = 26,8367 + 0,000237922 \times E_{MAX}$
	ME-1	σ_r/E	74,63% ***	$\sigma_r = 25,7537 + 0,00571166 \times E$
		σ_r/E_{MAX}	34,94% ***	$\sigma_r = 50,4983 + 0,000129141 \times E_{MAX}$
	ME-2	σ_r/E	67,60% ***	$\sigma_r = -10,9761 + 0,00785969 \times E$
		σ_r/E_{MAX}	76,78% ***	$\sigma_r = 32,2632 + 0,000245704 \times E_{MAX}$
	R	σ_r/E	51,094% ***	$\sigma_r = -23,0387 + 0,00825814 \times E$
		σ_r/E_{MAX}	70,82% ***	$\sigma_r = 17,6886 + 0,000299054 \times E_{MAX}$
30	TODAS	σ_r/E	95,36% ***	$\sigma_r = -18,8047 + 0,00601166 \times E$
		σ_r/E_{MAX}	88,35% ***	$\sigma_r = 17,7337 + 0,000147749 \times E_{MAX}$
40	TODAS	σ_r/E	73,23% **	$\sigma_r = 9,21436 + 0,00353171 \times E$
		σ_r/E_{MAX}	77,80% ***	$\sigma_r = 23,4318 + 0,0000536851 \times E_{MAX}$

Tabla 4. Regresión según grosores. (***) nivel de significación 99%, ** 95%, * 90%)

C.C	C.V	PARÁMETROS	R ²	RECTA DE REGRESIÓN
CC	TODAS	σ_r/E	30,46% ***	$\sigma_r = 35,6802 + 0,00372844 \times E$
		σ_r/E_{MAX}	2,83% *	$\sigma_r = 64,8581 + 0,0000396833 \times E_{MAX}$
		σ_r/ρ	42,26% *	$\sigma_r = -9,02744 + 180,589 \times \rho$
TA	TODAS	σ_r/E	36,44% ***	$\sigma_r = -0,335523 + 0,00552332 \times E$
		σ_r/E_{MAX}	41,39% ***	$\sigma_r = 34,9706 + 0,00012479 \times E_{MAX}$
		σ_r/ρ	0,15% *	$\sigma_r = 55,4217 - 10,2854 \times \rho$
CA	TODAS	σ_r/E	33,83% ***	$\sigma_r = 3,89099 + 0,00476814 \times E$
		σ_r/E_{MAX}	24,68% ***	$\sigma_r = 34,0966 + 0,000102612 \times E_{MAX}$
		σ_r/ρ	1,73% *	$\sigma_r = 23,1158 + 52,1296 \times \rho$

Tabla 5. Regresión según clases comerciales. (***) nivel de significación 99%, ** 95%, * 90%)

De los datos obtenidos se observa que la correlación no es muy significativa en ninguno de los casos, cuando los datos se desagregan en función de la calidad comercial.

A continuación, se muestran los resultados cuando se desagregan los datos atendiendo a la clasificación visual, en este caso también se ha realizado el análisis de regresión simple utilizando la Tensión de Rotura a Flexión como variable dependiente y la Densidad como variable independiente. (Tabla 6)

C.V	C.C	PARÁMETROS	R ²	RECTA DE REGRESIÓN
ME-1	TODAS	E/σ_r	20,44% ***	$\sigma_r = 43,6685 + 0,00272837 * E$
		E_{MAX}/σ_r	0,46% *	$\sigma_r = 67,4368 + 0,0000134445 * E_{max}$
		σ_r/δ	43,02% ***	$\sigma_r = -0,385744 + 159,758 * \rho$
ME-2	TODAS	E/σ_r	56,85% ***	$\sigma_r = -2,64283 + 0,00680115 * E$
		E_{MAX}/σ_r	49,02% ***	$\sigma_r = 42,1424 + 0,000163392 * E_{max}$
		σ_r/δ	66,73% ***	$\sigma_r = -106,164 + 377,855 * \rho$
R	TODAS	E/σ_r	41,30% ***	$\sigma_r = -7,77766 + 0,00624024 * E$
		E_{MAX}/σ_r	35,82% ***	$\sigma_r = 30,6538 + 0,000148148 * E_{max}$
		σ_r/δ	1,25% *	$\sigma_r = 31,7155 + 37,6621 * \rho$

Tabla 6. Regresión según clases resistentes. (***) nivel de significación 99%, ** 95%, * 90%)

De los resultados obtenidos se observa que en las tablas clasificadas como ME2, la correlación es relativamente fuerte para el análisis de la Tensión de Rotura a Flexión y el Módulo de Elasticidad ($R^2 = 56,85$) y para el análisis de Tensión de Rotura a Flexión y la Densidad ($R^2 = 66,73$), con niveles de significación del 99%.

Los valores de R^2 ponen de manifiesto que la correlación no es altamente significativa en el resto de los casos, cuando los datos se desagregan en función de la calidad comercial.

5. Conclusiones

Prácticamente todas las tablas de clasificación comercial CC, son clasificación visual ME1 y las CA, son Rechazo.

La clase comercial CC equivale a una clase resistente C20, la TA equivale a una clase resistente C16 y la CA equivale a una C14.

En las tablas estudiadas, la clase ME1 corresponde a una clase resistente C20, la ME2 a una clase resistente C22 y las tablas clasificadas como rechazo, a una clase resistente C14.

En todos los casos, el parámetro más restrictivo para la asignación de clases ha sido el módulo de elasticidad, ya que las clases que corresponderían por tensión de rotura o por densidad son muy superiores.

La presencia de nudos en las tablas de madera, afecta fundamentalmente a la tensión de rotura y a la energía absorbida durante el ensayo. El módulo de elasticidad se ve afectado en una medida muchísimo menor. Esta situación puede deberse a la mayor repercusión del grosor de los nudos frente al grosor total de las piezas ensayadas, en comparación con piezas de mayor escuadría.

Es un hecho conocido (Curry y Tory, 1976; Madsen, 1992; Bostróm, 1994 y 1999; Hermoso *et al.*, 2001) que las dimensiones de la pieza influyen en la resistencia a flexión.

Se han encontrado en las tablas de 27, 30 y 40 mm., coeficientes de determinación para regresiones lineales entre la tensión de rotura y el módulo de elasticidad longitudinal, valores muy similares a los encontrados por otros autores en piezas de gran escuadría. Para tablas de 22 mm. de espesor, el coeficiente de determinación, es muy bajo.

También se ha encontrado un alto coeficiente de determinación para tablas de 27 mm. de espesor, cuando se estudia la relación lineal entre la tensión de rotura a flexión y la máxima energía absorbida en el ensayo a flexión.

Considerando la tensión de rotura como variable dependiente y analizando su ajuste con la densidad para las diferentes clases comerciales, se observa que los coeficientes de determinación son muy bajos, a excepción de las piezas clasificadas como CC. El mismo análisis separando las piezas por su clasificación resistente, ofrece coeficientes de determinación relativamente fuertes para las piezas clasificadas como ME-1 y ME-2, siendo muy débil la correlación en las piezas clasificadas como rechazo.

Los coeficientes de determinación para variables consideradas como buenas predictoras de la Tensión de Rotura a Flexión, son del mismo orden que los que aparecen en la bibliografía como obtenidos por otros autores en piezas de mayor escuadría.

Agradecimientos

Los autores agradecen al profesor D. Joaquín Santiago su colaboración en la traducción a la lengua inglesa del Abstract.

Bibliografía

- ARRIAGA, F.; ESTEBAN, M.; RELEA, E. (2005). "Evaluación de la capacidad portante de piezas de gruesa escuadría de madera de conífera en estructuras existentes". *Materiales de Construcción*. Vol. 55, nº 280, pp. 43-52.
- GUTIÉRREZ, A., 1.967 "Características físico-mecánicas de las maderas españolas" Ed. IFIE, Madrid.
- FERNÁNDEZ-GOLFÍN J.I.; DÍEZ M.R., 1.998 "Influencia de diversos factores en la calidad de la madera de uso estructural de *P. sylvestris* L". Investigación Agraria Serie Recursos Forestales, nº1-2.
- HERMOSO, E. et al, 2.002. "Madera estructural de pino silvestre: caracterización mecánica" Ed. INIA, Investigación Agraria: Serie recursos Forestales, Vol 11.
- AITIM, 1994. "Propiedades mecánicas de la madera de pino silvestre de Valsáin.". Informe Interno
- CEN TC 124, 1999. "Timber structures. Strength graded structural timber with rectangular cross section."
- DIN 4074-1, 1989. "Clasificación de la madera de coníferas según su capacidad portante." DIN.
- EN 518, 1995. "Structural timber. Grading. Requirements for usual strength grading."
- EN 336, 1998. "Structural timber. Softwoods and poplar sizes. Permitted deviations."
- EN 384, 1999. "Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad."
- EN 408, 1999. "Madera estructural. Madera estructural y madera laminada. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas."
- EN 1912, 1999. "Madera estructural. Clases resistentes. Asignación de especies y calidades visuales."
- EN 14081, 2000. "Timber structures. Strength graded structural timber with rectangular cross section."
- FERNÁNDEZ-GOLFÍN J.I., DÍEZ M.R., 1999. "Coníferas españolas de uso estructural. Propiedades de la madera aserrada." AITIM n.º 200.

- FERNÁNDEZ-GOLFÍN J.I.; DÍEZ M.R.; GUTIÉRREZ A., 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. 6 (1 y 2).
- FERNÁNDEZ-GOLFÍN J.I.; DÍEZ M.R.; GUTIÉRREZ A., 1998. "Caracterización mecánica de la madera aserrada de uso estructural, clasificada visualmente de acuerdo con la norma UNE 56.544." Materiales de construcción. Vol. 48. nº 252.
- FERNÁNDEZ-GOLFÍN J.I.; GUTIÉRREZ A.; BAONZA M.V.; DÍEZ M.R., 1995. "Características físico-mecánicas de las maderas de especies de crecimiento rápido de procedencia española." Revista de Investigación Agraria 4.
- FEWELL A.R., 1979 (b). "Stress graded timber for structural use. Stress grading information." Princess Risborough Laboratory. 3-4.
- GONZÁLEZ GARCÍA, M.N., 2010. "Consideraciones respecto a los sistemas provisionales de protección de borde." Tesis doctoral. UPM.
- INSTA 142, 1994. "Nordic visual stress grading rules from timber."
- ORTIZ J.; MARTÍNEZ J.J., 1991. "Características mecánicas de la madera de pino gallego, obtenidas a partir de ensayos con piezas de tamaño estructural." AITIM 150.
- UNE 56.544, 1999. "Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural."
- UNE-EN 338, 2010. "Madera estructural. Clases de resistencia."
- UNE-EN 384, 1996. "Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad." AENOR
- UNE-EN 408, 1995. "Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas."