



Received: dd-mm-aaaa  
Accepted: dd-mm-aaaa

## Comportamiento mecánico de piezas de madera de pino silvestre de pequeña escuadría sometidas a compresión longitudinal a las fibras Mechanical behavior of small pine wood pieces subjected to a longitudinal - compressive stress to the fibers

Inmaculada Martínez-Pérez<sup>a</sup>, Nuria Llaudará-Pérez<sup>b</sup>, M<sup>a</sup> de las Nieves González-García<sup>a</sup> & Alfonso Cobo-Escamilla<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Dpto. Construcciones Arquitectónicas y su Control, Universidad Politécnica de Madrid (i.martinez@upm.es, mariadelasnieves.gonzalez@upm.es), <sup>b</sup>Dpto. Tecnología de la Edificación, Universidad Politécnica de Madrid (nuria.llaudado@upm.es, alfonso.cobo@upm.es)

---

**Resumen**— En este trabajo se analiza el comportamiento a compresión de piezas de madera de pino silvestre de pequeña escuadría sometidas a un esfuerzo de compresión longitudinal a las fibras. Se han obtenido las propiedades mecánicas asociadas a este tipo de sollicitación, se ha analizado qué correlaciones pueden emplearse con éxito y se ha comprobado el ajuste de los valores obtenidos con los estimados por las normas de clasificación visual y resistente de la madera en uso. Para ello se han ensayado a compresión en sentido longitudinal a la fibra y hasta rotura 11 piezas de madera de pino silvestre de pequeña escuadría de 27x140x300mm. Las piezas ensayadas son ME1 según clasificación visual de UNE 56544 y clasificación mecánica C27 según UNE-EN 1912. En las conclusiones se presentan los resultados del análisis de las correlaciones efectuadas en la investigación.

**Palabras clave**— Edificación; Madera; Esfuerzo de Compresión Longitudinal; Deformación.

---

**Abstract**— This paper presents an experimental study of the compression behaviour of small pine wood pieces subjected to a longitudinal - compressive stress to the fibers. The mechanical properties obtained are associated with this type of load. The correlations that can be used successfully have been analysed and the concordance between the values obtained with those estimated by the visual grading rules of sawn timber for structural use has been tested. To this end, 11 small pine wood pieces (27x140x300mm) have been tested, subjected to a longitudinal - compressive stress to the fibers. The wood pieces tested are ME1 according to visual classification of UNE 56544 and C27 according to mechanical classification of UNE-EN 1912. The results of the analysis of correlations are presented in the conclusions.

**Index Terms**—Building; Wood; Longitudinal Compressive Stress; Deformation.

## I. INTRODUCCIÓN

La estructura de la madera está adaptada para conseguir una resistencia máxima en las direcciones sometidas a las solicitaciones mientras que en las otras direcciones la resistencia es muy baja.

Las células de la madera en las coníferas están predominantemente orientadas en una dirección, llamada dirección de la fibra o dirección granular, ésta es la dirección más resistente, generalmente paralela al eje del tronco. En las coníferas, la fibra estructural situada en las zonas predominantemente comprimidas (por ejemplo, en la parte

disminución en el valor de la máxima tensión alcanzada (Argüelles, 1969). Este tipo de sollicitación se produce con frecuencia en edificación en casos como, por ejemplo, apeos y apuntalamientos (figura 1).

baja de las ramas) es diferente del resto de la madera y está optimizada para resistir las sollicitaciones de compresión. Bajo unas condiciones especiales de crecimiento, puede formarse en el tronco una fibra estructural similar, especialmente en la parte baja del árbol.

Este tipo de madera se conoce como madera de compresión. La resistencia y rigidez en la dirección de la fibra es muy alta en relación al peso del material, especialmente bajo

TABLA I  
RELACIONES DE RESISTENCIA/DENSIDAD PARA ALGUNOS MATERIALES ESTRUCTURALES

Material	Densidad (KG/m <sup>3</sup> )	Resistencia (MPa)	Resistencia/Densidad (10 <sup>3</sup> MPa·m <sup>3</sup> /kg)
Acero estructural (compresión o tracción)	7800	400-1000	50-130
Aluminio (compresión o tracción)	2700	100-300	40-110
Hormigón (compresión)	2300	30-120	13-50
Madera de conífera (tracción)	400-600	40-200	100-300
Madera de conífera (compresión)	400-600	30-90	70-150
Madera estructural (tracción)	400-600	15-40	30-80
Fibra de vidrio en epoxi (tracción)			500
Fibra de carbón en epoxi (tracción)			1000

La anisotropía de la madera es uno de los aspectos que más diferencian a la madera de otros materiales pudiendo estimarse que el comportamiento de la madera para cualquier propiedad física o mecánica en dirección paralela a la fibra es más favorable que en dirección perpendicular.

La capacidad de carga de la madera está muy condicionada por la presencia y características de defectos de crecimiento aleatorios, de modo que, la resistencia de elementos de madera también depende del tamaño de los elementos estructurales en sí, y de la forma en que se cargan. Esa fuerte anisotropía de la madera influye también notablemente en las propiedades relacionadas con la rigidez. El módulo de elasticidad perpendicular a la fibra, es normalmente 50-80 veces más pequeño que el paralelo a la fibra

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.

Tradicionalmente se admite que el diagrama tensión deformación de una pieza de madera sometida a un esfuerzo de compresión longitudinal a la fibra hasta su rotura experimenta una primera fase lineal seguida de otra en la cual se pierde la linealidad y se pierde rigidez hasta alcanzar la tensión máxima. La rotura se produce después de grandes deformaciones durante las cuales no se produce una gran

solicitaciones de tracción. La tabla I muestra una comparativa de relaciones entre la resistencia y la densidad para los materiales estructurales más habituales.



Fig. 1. Elementos de madera trabajando a compresión longitudinal a las fibras.

## II. OBJETIVOS

Para analizar el comportamiento a compresión de piezas de madera de pino silvestre de pequeña escuadría sometidas a un esfuerzo de compresión longitudinal a las fibras, se han

ensayado dichas piezas para obtener las propiedades mecánicas asociadas a este tipo de sollicitación, se ha analizado qué correlaciones pueden emplearse con éxito y se ha comprobado el ajuste de los valores obtenidos con los estimados por las normas de clasificación visual y resistente de la madera en uso.

### III. MATERIALES Y TÉCNICAS EMPLEADAS

Se han ensayado a compresión en sentido longitudinal a la fibra y hasta rotura 11 piezas de madera de pino silvestre de pequeña escuadría de unas dimensiones aproximadas de 27 mm de espesor, 140 mm de anchura y 300 mm de altura. Los ensayos se han realizado en la prensa de ensayos universal, marca IBERTEST, modelo MIB-60/AM, que utiliza el software Wintest 32. Se ha controlado el desplazamiento a una velocidad de 0,3 mm/min. Todas las tablas ensayadas son ME1 según la clasificación visual de UNE 56544 (AENOR, 2011b) y les corresponde una clasificación mecánica C27 según UNE-EN 1912. (AENOR, 2012/AC:2013).

### IV. RESULTADOS OBTENIDOS

Después del ensayo a compresión hasta rotura se han obtenido los siguientes resultados: Tensión de rotura, módulo de elasticidad, deformación máxima (correspondiente a la tensión de rotura), deformación última (correspondiente a la del agotamiento del material), densidad de energía de deformación máxima (área encerrada por el diagrama tensión deformación hasta el punto de tensión máxima), densidad de energía de deformación última (área total encerrada por el diagrama tensión deformación), ductilidad en términos de deformación (obtenida como el cociente entre la deformación última y la deformación máxima), ductilidad en términos de densidad de energía (obtenida como el cociente entre la densidad de energía última y la densidad de energía máxima) y densidad.

En la tabla 2 se indican los valores obtenidos para cada una de las piezas ensayadas junto a los correspondientes valores medios para cada propiedad obtenida.

TABLA II  
VALORES OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE COMPRESIÓN TRANSVERSAL.

Elemento	$\sigma$ máx (Mpa)	$\square$ máx.	$\square u^a$	E (N/mm <sup>2</sup> )	A máx.	Au	$\square u/\square$ máx.	Au/A máx.	P (Kg/m <sup>3</sup> )
CC1(27)a1	52,0289	0,0077	0,0081	7781,9702	0,2257	0,2429	1,0519	1,0762	483,7000
CC1(27)b1	42,1421	0,0067	0,0099	8001,2129	0,1765	0,2929	1,4776	1,6595	519,3340
CC2(27)b1	17,6099	0,0041	0,0243	4507,2467	0,0408	0,5210	5,9268	12,7696	470,5400
CC2(27)b2	38,1041	0,0080	0,0312	6189,8426	0,1826	0,8571	3,9000	4,6939	459,2840
CC4(27)a1	48,9015	0,0079	0,0096	8209,8762	0,2412	0,3726	1,2152	1,5448	534,2490
CC4(27)a2	53,6780	0,0080	0,0120	8673,2788	0,2580	0,4326	1,5000	1,6767	534,8880
CC5(27)a1	39,2078	0,0067	0,0157	7062,8597	0,1478	0,5632	2,3433	3,8106	524,8770
CC5(27)b2	19,5444	0,0043	0,0169	7294,2197	0,0560	0,2720	3,9302	4,8571	477,2470
CC6(27)a1	20,8739	0,0048	0,0070	5772,6074	0,0614	0,1029	1,4583	1,6759	561,4720
CC7(27)a1	60,8608	0,0076	0,0103	9722,0706	0,2650	0,4129	1,3553	1,5581	615,8080
CC8(27)b	43,3368	0,0088	0,0109	6620,2747	0,2286	0,3136	1,2386	1,3718	430,9420
$\bar{x}_r$	39,6626	0,0068	0,0142	7257,7690	0,1712	0,3985	2,3088	3,3358	510,2128
D.T.	14,6644	0,0016	0,0075	1454,9129	0,0840	0,2001	1,5859	3,4210	52,4442
C.V.	2,7047	4,1199	1,8936	4,9885	2,0389	1,9915	1,4559	0,9751	9,7287

### V. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS VALORES OBTENIDOS

#### A. Tensiones de rotura y módulos de elasticidad

La media de los valores de la tensión de rotura ha sido de 39,66 MPa y la media de los módulos de elasticidad de 7258 MPa. Si se comparan estos valores con los estimados por la norma UNE-EN 338 (AENOR, 2010a ERRATUM:2011) en función de la clasificación visual de la madera (22 MPa para la tensión de rotura y 11500 MPa para el módulo de elasticidad) se puede afirmar que la norma es conservadora cuando se trata de estimar los valores de tensión de rotura y queda del lado de la inseguridad cuando estima los valores del módulo de elasticidad. En este punto hay que tener en cuenta que el valor

de la tensión de rotura estimado por la norma es un valor característico, que se ha comparado con un valor medio

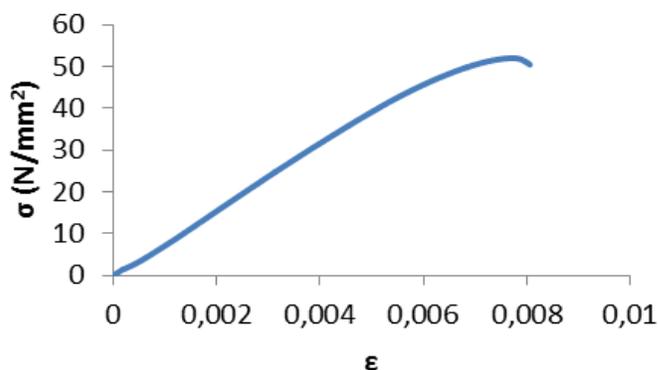


Fig. 2. Diagrama tensión deformación de la pieza CC1(27)a1.

experimental. Para la densidad, se ha obtenido experimentalmente un valor medio de 510kg/m<sup>3</sup>, mientras que la norma predice un valor medio de 450 kg/ m<sup>3</sup>, un 13% inferior.

*B. Diagramas tensión-deformación y forma de rotura*

En la figura 2 se muestra el diagrama tensión deformación de la pieza CC1(27)a1.

de ensayo para una deformación de un 7,7%. La rotura se produce para una deformación del 8,1%. Esto supone una ductilidad muy baja (1,05 medida en términos de deformaciones o de 1,08 medida en términos de densidad de energía de deformación). En la figura 3 puede comprobarse el estado de deformación de la pieza instantes antes de la rotura.

En otros casos la rotura se produce con mayores niveles de



Fig. 3. Fotografía de la pieza CC1(27)a1 antes de la rotura.

Este diagrama es representativo del comportamiento de dos de las piezas ensayadas. Ambas piezas han mostrado un comportamiento relativamente frágil y muy alejado del que se indica como patrón en la literatura estudiada. El diagrama es prácticamente lineal hasta rotura, alcanzando la carga máxima



Fig. 5. Fotografía de la pieza CC1(27)b1 antes de la rotura.

deformación. Así por ejemplo en la figura 4 se muestra el diagrama tensión deformación hasta rotura de la pieza CC1(27)b1.

Puede apreciarse como el comportamiento de la pieza es algo más dúctil que en el caso anterior, apareciendo una rama de descarga después de alcanzarse la máxima carga de ensayo. En la figura 5 se muestra una fotografía del momento en el que se produce el fallo de la pieza.

En este caso los valores de ductilidad medidos en términos de deformaciones (1,48) o de energías (1,66) son algo superiores a los anteriores.

*C. Correlaciones entre las variables mecánicas*

A continuación, se han obtenido las correlaciones entre las propiedades mecánicas estudiadas y sus correspondientes coeficientes.

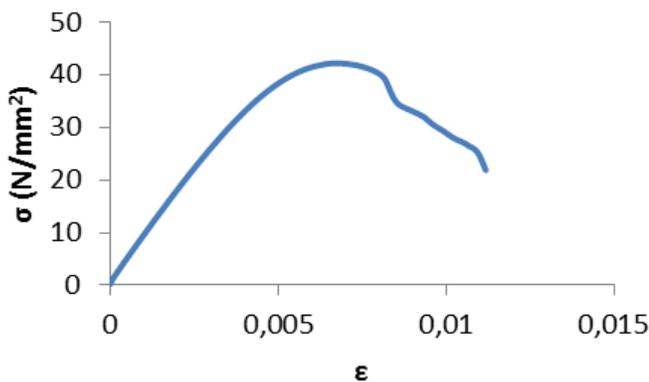


Fig. 4. Diagrama tensión deformación de la pieza CC1(27)b1.

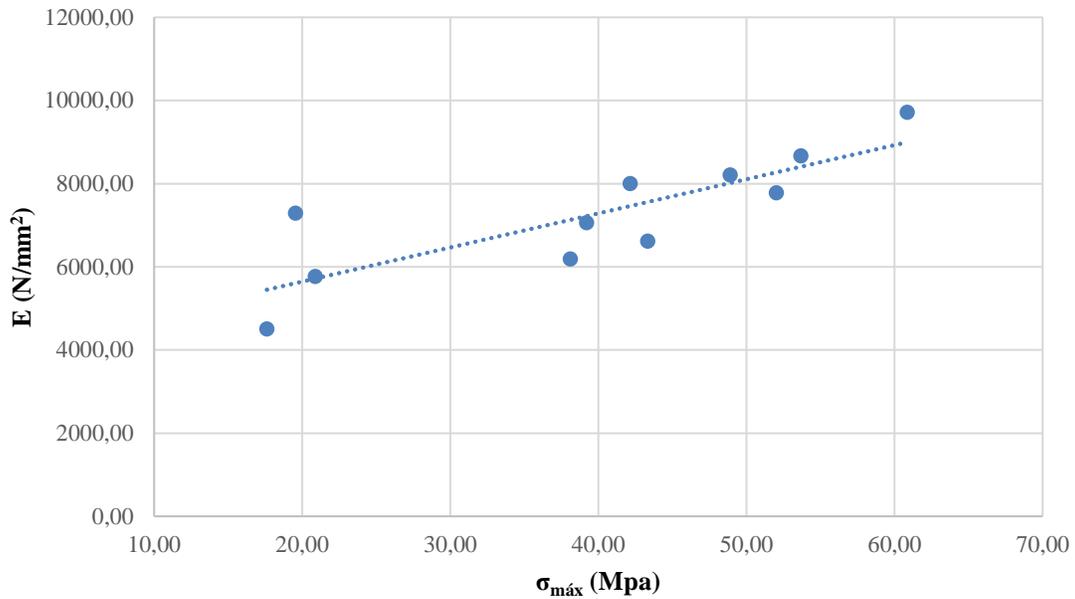


Fig. 6. Correlación entre el módulo de elasticidad y la tensión de rotura.

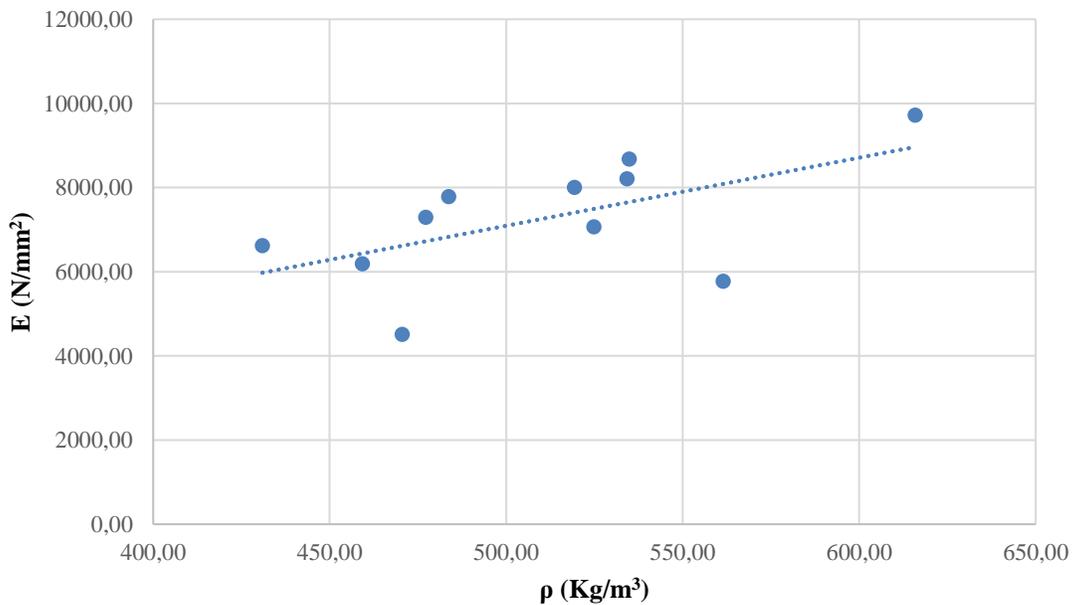


Fig. 7. Correlación entre el módulo de elasticidad y la tensión de rotura.

Se han analizado las correlaciones entre las siguientes variables: Módulo de elasticidad y tensión de rotura; módulo de elasticidad y densidad; tensión de rotura y densidad; ductilidad en términos de deformación y ductilidad en términos de energía; módulo de elasticidad y ductilidad en términos de deformación; módulo de elasticidad y ductilidad en términos de energía; tensión de rotura y ductilidad en

términos de deformación; tensión de rotura y ductilidad en términos de energía.

En las figuras 6 - 13 se muestran los gráficos obtenidos y en la tabla 3 se indica un resumen con las ecuaciones de las rectas de regresión y el coeficiente de correlación.

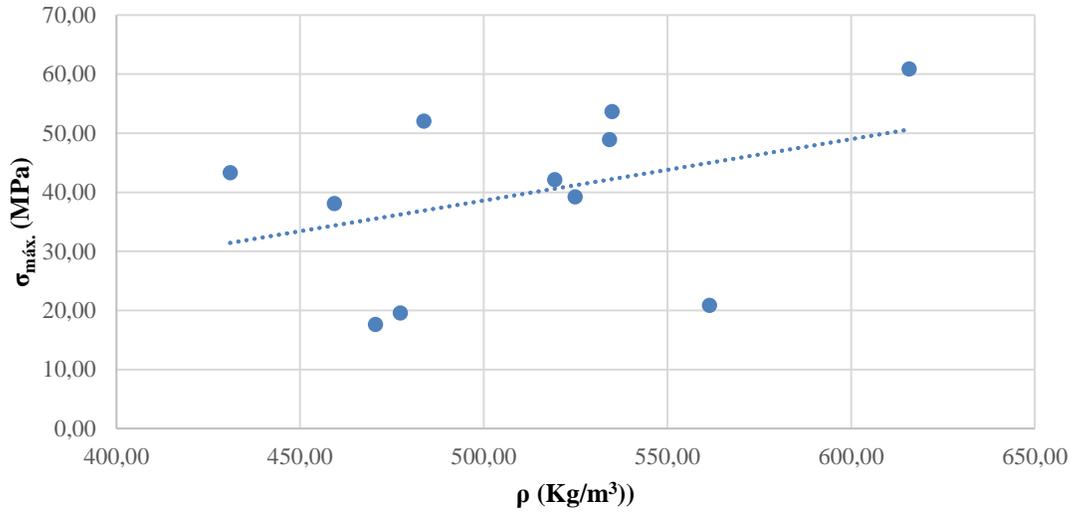


Fig. 8. Correlación entre el módulo de elasticidad y la tensión de rotura.

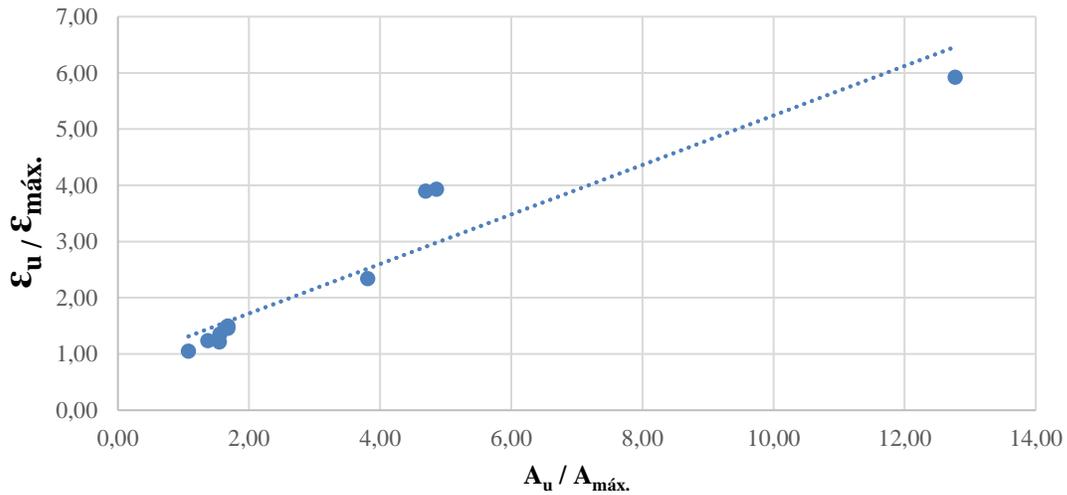


Fig. 9. Correlación entre el módulo de elasticidad y la tensión de rotura.

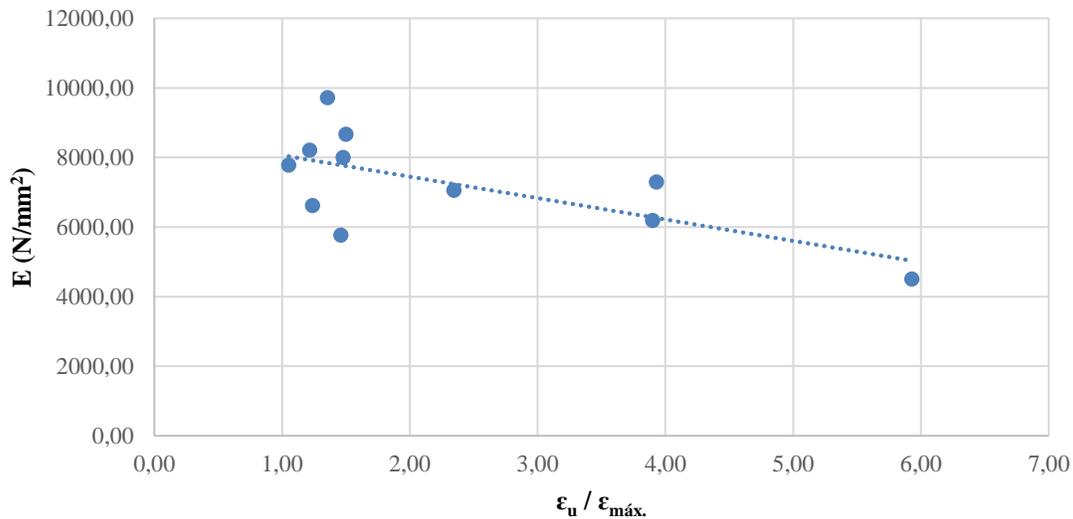


Fig. 10. Correlación entre el módulo de elasticidad y la tensión de rotura.

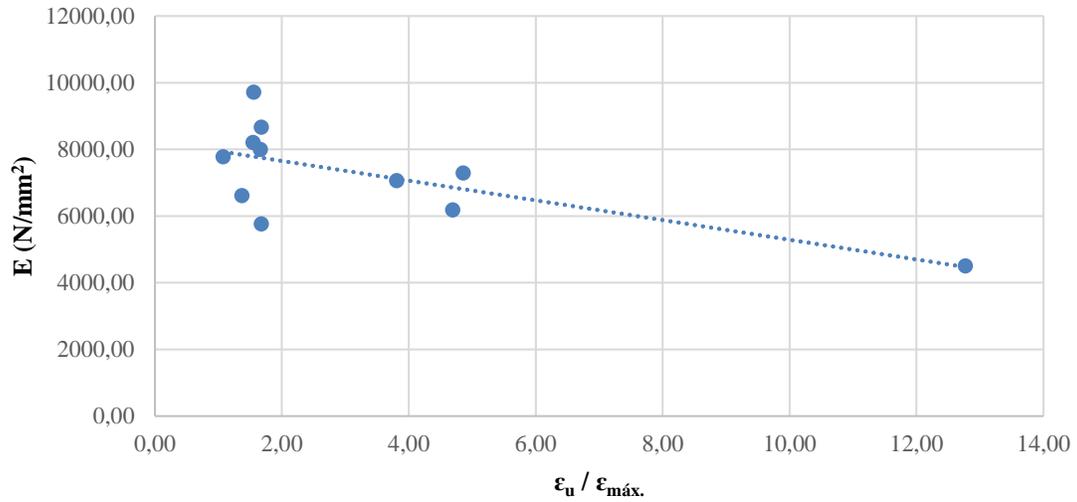


Fig. 11. Correlación entre el módulo de elasticidad y la tensión de rotura.

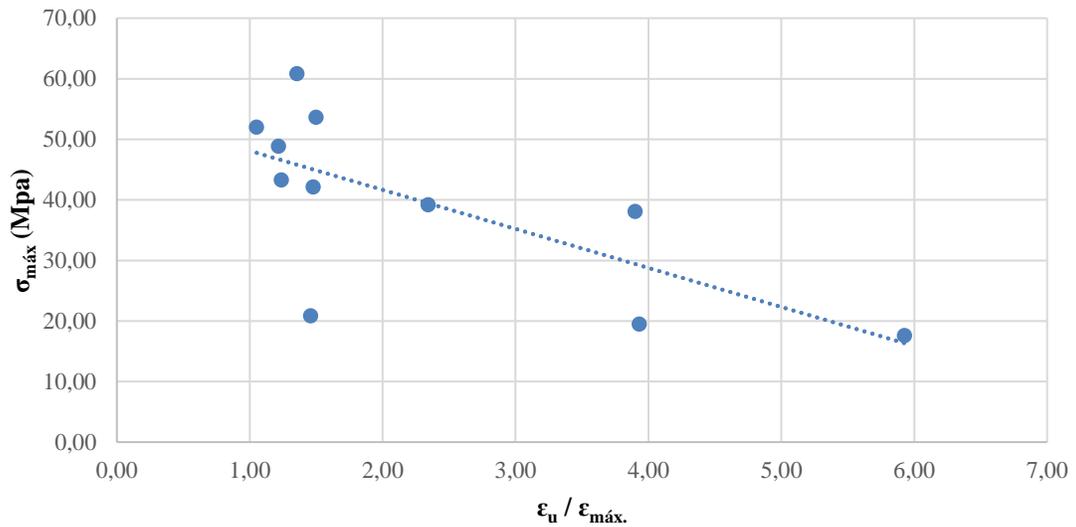


Fig. 12. Correlación entre el módulo de elasticidad y la tensión de rotura.

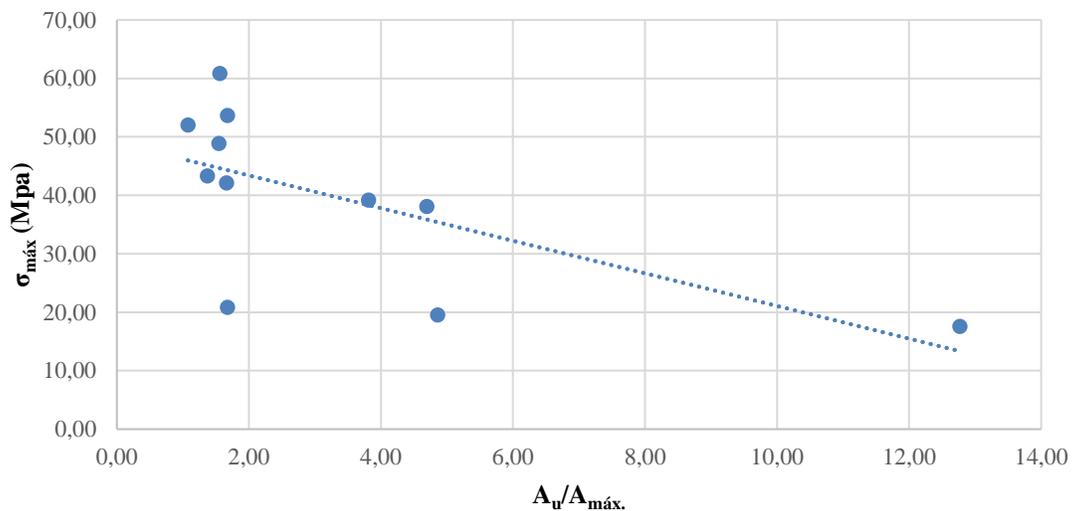


Fig. 13. Correlación entre el módulo de elasticidad y la tensión de rotura.

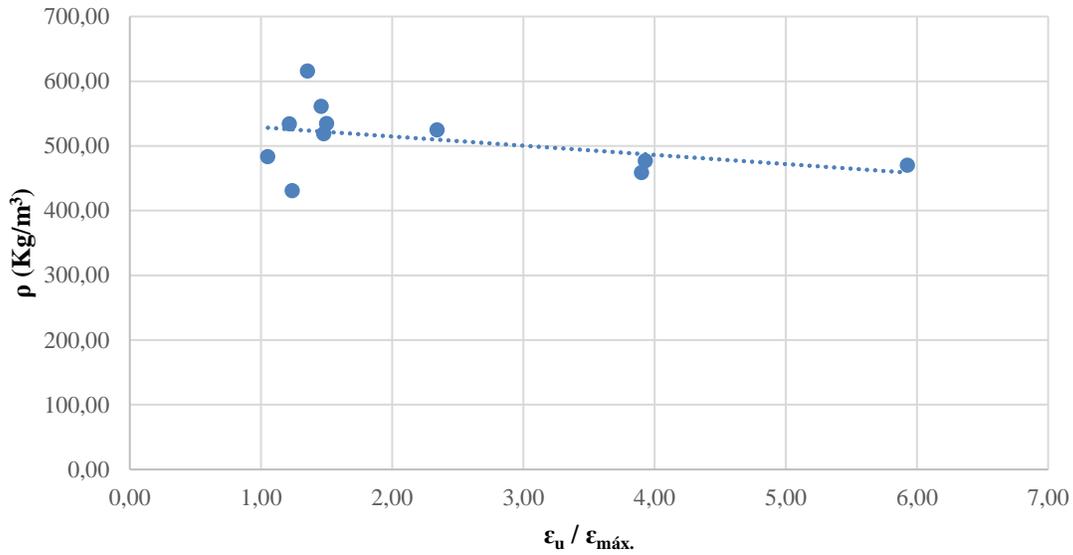


Fig. 14. Correlación entre el módulo de elasticidad y la tensión de rotura.

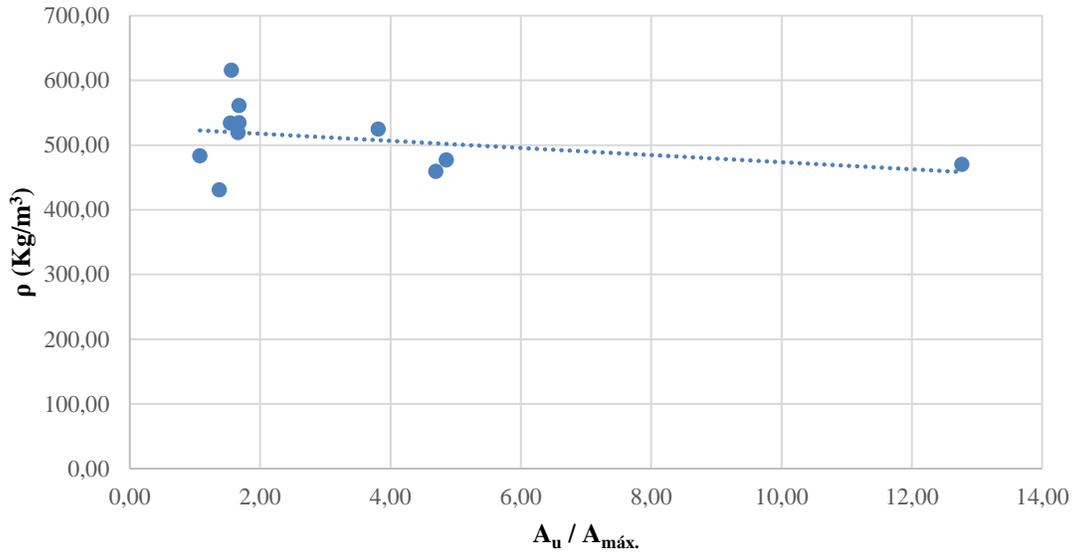


Fig. 15. Correlación entre el módulo de elasticidad y la tensión de rotura.

TABLA II  
 Ecuaciones de las rectas de regresión y coeficiente de correlación

VARIABLES	RECTA DE REGRESIÓN	R <sup>2a</sup>
E - σ máx	E = 82,047 σ máx + 4003,559	0,684
E - ρ	E = 16,171 ρ - 992,971	0,340
σ máx - ρ	σ máx = 0,104 ρ - 13,346	0,138
ε u ε máx. - Au A máx.	ε u / ε máx. = 0,44 Au / A máx. + 0,84	0,902
E - ε u ε máx.	E = -614,922 ε u / ε máx. + 8677,531	0,449
E - Au A máx.	E = -295,508 Au / A máx. + 8243,536	0,483
σ máx - ε u ε máx.	σ máx = -6,446 ε u / ε máx. + 54,545	0,486
σ máx - Au A máx.	σ máx = -2,791 Au / A máx. + 48,972	0,424
ρ - ε u ε máx.	ρ = -14,213 ε u / ε máx. + 543,029	0,185
ρ - Au A máx.	ρ = -5,495 Au / A máx. + 528,544	0,128

El análisis de las figuras 6 - 13 y de la tabla 3 indican que no existe ninguna correlación entre la densidad y cualquiera de las variables estudiadas.

La mejor correlación se obtiene entre la ductilidad evaluada en términos de deformación y la ductilidad evaluada en términos de energía de deformación, con un coeficiente de determinación muy elevado ( $R^2=0,90$ ).

Existe una buena correlación entre el módulo de elasticidad y la tensión de rotura ( $R^2=0,68$ ).

Los coeficientes de determinación obtenidos entre el módulo de elasticidad o la tensión de rotura con la ductilidad son muy similares, oscilando entre los valores 0,42 y 0,49.

## VI. CONCLUSIONES

El sistema establecido por las normas UNE para estimar propiedades mecánicas de la madera es conservadora cuando se trata de estimar los valores de tensión de rotura y queda del lado de la inseguridad cuando estima los valores del módulo de elasticidad para este tipo de sollicitación y esta especie de madera de pequeña escuadría.

No existe ninguna correlación entre la densidad y cualquiera de las variables estudiadas.

Existe una correlación excelente entre la ductilidad evaluada en términos de deformación y la ductilidad evaluada en términos de energía de deformación.

Existe una buena correlación entre el módulo de elasticidad y la tensión de rotura.

Los coeficientes de determinación obtenidos entre el módulo de elasticidad o la tensión de rotura con la ductilidad son muy similares, oscilando entre los valores 0,42 y 0,49.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Departamento de Tecnología de la Edificación de la Escuela Técnica Superior de Edificación ETSEM de la Universidad Politécnica de Madrid UPM y al Laboratorio de Materiales de Construcción del Departamento de Construcciones Arquitectónicas y su Control, de la ETSEM UPM por su apoyo para la realización de este trabajo.

## REFERENCIAS

- Argüelles R. (1969). Cálculo de estructuras de madera AITIM Madrid.
- Arriaga, F., Esteban, M. & Relea, E. (2005). Evaluation of the load carrying capacity of large cross section coniferous timber in standing structures. *Materiales de Construcción*, 55(280), 43-52. doi:10.3989/mc.2005.v55.i280.205
- Baño, V., Argüelles-Bustillo, R., Regueira, R. & Guaita, M. (2012). Determinación de la curva tensión-deformación en madera de 'Pinus sylvestris' L. para la simulación numérica de vigas de madera libre de defectos. *Materiales de Construcción*, 62(306), 2628452. doi:10.3989/mc.2012.64110
- CTE (2006). Documento básico de seguridad estructural: Madera. Ministerio de Fomento. España.
- Dackermann, U.; Elsener, R.; Li, J.; Crews, K. (2015). A comparative study of using static and ultrasonic material testing methods to determine the anisotropic material properties of wood. *Const. Build. Mater.*
- Eurocode 5. (1993). Design of timber structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. European Committee for Standardization, Bruxelles, Belgium.
- Hermoso, E., Fernández-Golfín, J.I. & Díez, M.R. (2002). Madera estructural de pino silvestre: caracterización mecánica. *Revista de Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 11 (2), 425-440.
- UNE 56544. (2011b) Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas. Madrid: Asociación Española de Normalización. AENOR, Madrid.
- UNE-EN 1912 (2012/AC:2013) Madera estructural. Clases resistentes. Asignación de calidades visuales y especies. Madrid: Asociación Española de Normalización. AENOR, Madrid.
- UNE-EN 338. (2010a ERRATUM:2011). Madera estructural. Clases resistentes. Madrid: Asociación Española de Normalización. AENOR, Madrid.



**Reconocimiento – NoComercial (by-nc):** Se permite la generación de obras derivadas siempre que no se haga un uso comercial. Tampoco se puede utilizar la obra original con finalidades comerciales.