



Received: 06-03-2016  
Accepted: 13-03-2016

Anales de Edificación  
Vol. 2, Nº3, 33-40 (2016)  
ISSN: 2444-1309  
Doi: 10.20868/ade.2016.3470

## Análisis experimental del comportamiento mecánico de elementos de madera de pino silvestre de pequeña escuadría sometidos a compresión transversal a las fibras Experimental analysis of the mechanical behavior of small squad pine wood elements subjected to cross-fiber compression

Nuria Llauradó, Nieves González, Pilar de la Rosa García, Álvaro Santamaría

E.T.S. de Edificación. Universidad Politécnica de Madrid (nuria.laurado@upm.es, mariadelasnieves.gonzalez@upm.es, pilar.delarosa@upm.es)

---

**Resumen**— En numerosos detalles estructurales de construcciones realizadas con madera, el esfuerzo de compresión transversal a las fibras juega un papel muy importante y en muchas ocasiones condiciona su diseño. 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 transversal a las fibras y se han obtenido unos valores medios para la tensión de rotura y el módulo de elasticidad de 4,20 MPa y 305,86 MPa, respectivamente.

*Palabras clave*— Madera; construcción; esfuerzo de compresión; deformación.

---

**Abstract**- In many structural details of buildings made of wood, the transverse compression stress to the fibers plays a very important role and often determines its design. In this work, the compression behavior of small pine wood pieces subjected to a cross - compressive stress to the fibers is analyzed and mean values for the tensile strength and the modulus of elasticity of 4,20 MPa and 305.86 MPa, respectively.

*Index Terms*— Wood; construction; compressive stress; deformation.

---

## I. INTRODUCCIÓN

En numerosos detalles estructurales de construcciones realizadas con madera, el esfuerzo de compresión transversal a las fibras juega un papel muy importante y en muchas ocasiones condiciona su diseño (Leijten et al. 2010).

Un ejemplo de ello se encuentra en las estructuras de madera, usadas principalmente en Estados Unidos y Canadá, formadas por marcos ligeros donde se coloca una carrera de madera entre las vigas de piso y los elementos verticales en los que descansan (Leijten et al. 2012).

TABLA I  
VALORES OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE COMPRESIÓN TRANSVERSAL

|            | $\sigma_{m\acute{a}x}$<br>(MPa) | $\epsilon_{m\acute{a}x}$ | $\epsilon_u$ | E<br>(MPa) | $A_{m\acute{a}x}$<br>(MPa) | $A_u$<br>(MPa) | $\epsilon_u/\epsilon_{m\acute{a}x}$ | $A_u/A_{m\acute{a}x}$ | $\rho$<br>(Kg/m <sup>3</sup> ) |
|------------|---------------------------------|--------------------------|--------------|------------|----------------------------|----------------|-------------------------------------|-----------------------|--------------------------------|
| CC1(27)a3  | 5,2409                          | 0,0335                   | 0,1180       | 324,7785   | 0,1262                     | 0,5152         | 3,5224                              | 4,0824                | 486,6590                       |
| CC2(27)a3  | 3,8028                          | 0,0352                   | 0,0932       | 205,9076   | 0,0916                     | 0,2932         | 2,6477                              | 3,2009                | 433,9790                       |
| CC2(27)b3  | 4,2878                          | 0,0420                   | 0,1455       | 202,5049   | 0,1305                     | 0,5602         | 3,4643                              | 4,2927                | 444,4820                       |
| CC3(27)a1  | 4,0590                          | 0,0410                   | 0,0911       | 237,3642   | 0,1253                     | 0,3166         | 2,2220                              | 2,5267                | 505,2330                       |
| CC3(27)b3  | 1,5759                          | 0,0274                   | 0,0372       | 196,0880   | 0,0344                     | 0,0492         | 1,3577                              | 1,4302                | 509,1810                       |
| CC3(27)b2  | 4,9385                          | 0,0389                   | 0,0860       | 280,0881   | 0,1295                     | 0,3609         | 2,2108                              | 2,7869                | 517,5090                       |
| CC4(27)b3  | 5,8075                          | 0,0285                   | 0,0841       | 373,3335   | 0,1141                     | 0,3996         | 2,9509                              | 3,5022                | 549,2810                       |
| CC5(27)a2  | 4,4453                          | 0,0265                   | 0,1139       | 223,1613   | 0,0812                     | 0,4123         | 4,2981                              | 5,0776                | 513,6440                       |
| CC5(27)a3  | 5,3617                          | 0,0448                   | 0,1220       | 300,7566   | 0,1705                     | 0,5438         | 2,7232                              | 3,1894                | 478,8960                       |
| CC5(27)b3  | 1,3646                          | 0,0149                   | 0,0351       | 272,9507   | 0,0159                     | 0,0398         | 2,3557                              | 2,5031                | 462,7690                       |
| CC6(27)a2  | 7,1806                          | 0,0948                   | 0,1243       | 403,5009   | 0,5687                     | 0,7793         | 1,3112                              | 1,3703                | 597,0890                       |
| CC6(27)b3  | 4,9194                          | 0,0751                   | 0,1224       | 277,9133   | 0,3217                     | 0,5443         | 1,6298                              | 1,6919                | 561,0150                       |
| CC7(27)b2  | 1,5941                          | 0,0091                   | 0,0203       | 379,8940   | 0,0117                     | 0,0288         | 2,2308                              | 2,4615                | 648,3080                       |
| CC7(27)b3  | 6,1582                          | 0,0247                   | 0,0872       | 458,6680   | 0,1077                     | 0,4712         | 3,5304                              | 4,3751                | 676,5200                       |
| CC8(27)a3  | 1,1897                          | 0,0075                   | 0,0163       | 265,4582   | 0,0065                     | 0,0156         | 2,1733                              | 2,4000                | 461,6450                       |
| CC8(27)a4  | 2,3730                          | 0,0125                   | 0,0234       | 255,3278   | 0,0191                     | 0,0422         | 1,8720                              | 2,2094                | 463,8720                       |
| CC8(27)b3  | 4,3953                          | 0,0299                   | 0,1117       | 256,9692   | 0,0902                     | 0,3835         | 3,7358                              | 4,2517                | 436,8770                       |
| CC9(27)a3  | 4,7591                          | 0,0247                   | 0,1019       | 266,5767   | 0,0751                     | 0,4202         | 4,1255                              | 5,5952                | 526,0930                       |
| CC9(27)a4  | 4,4727                          | 0,0233                   | 0,0980       | 245,7461   | 0,0679                     | 0,3744         | 4,2060                              | 5,5140                | 530,0200                       |
| CC9(27)b3  | 6,5004                          | 0,0264                   | 0,0736       | 368,0226   | 0,1104                     | 0,3718         | 2,7879                              | 3,3678                | 557,4350                       |
| CC10(27)b2 | 1,9187                          | 0,0065                   | 0,0630       | 453,5060   | 0,0096                     | 0,1104         | 9,6923                              | 11,5000               | 573,5800                       |
| CC10(27)b3 | 6,1588                          | 0,0190                   | 0,1321       | 480,4253   | 0,0753                     | 0,7251         | 6,9526                              | 9,6295                | 610,9960                       |
| $\bar{x}$  | 4,2047                          | 0,0312                   | 0,0864       | 305,8610   | 0,1129                     | 0,3526         | 3,2727                              | 3,9527                | 524,7765                       |
| D.T.       | 1,7984                          | 0,0208                   | 0,0387       | 86,7270    | 0,1233                     | 0,2245         | 1,9068                              | 2,4784                | 67,1380                        |
| C.V.       | 2,3381                          | 1,4992                   | 2,2323       | 3,5267     | 0,9157                     | 1,5709         | 1,7163                              | 1,5948                | 7,8164                         |

de andamios o apoyos de vigas.

El diagrama tensión deformación de una pieza de madera sometida a un esfuerzo de compresión transversal 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. Finalmente se produce la rotura antecedida de grandes deformaciones durante las cuales no se experimenta una gran disminución en el valor de la máxima tensión alcanzada. A título orientativo, ha sido usual asignar a las coníferas una resistencia a compresión perpendicular a las fibras del orden de 1/5 a 1/7 de la resistencia a compresión axial, oscilando su valor absoluto entre 3,5 MPa y 12,0 MPa (Argüelles and Arriaga, 1988).

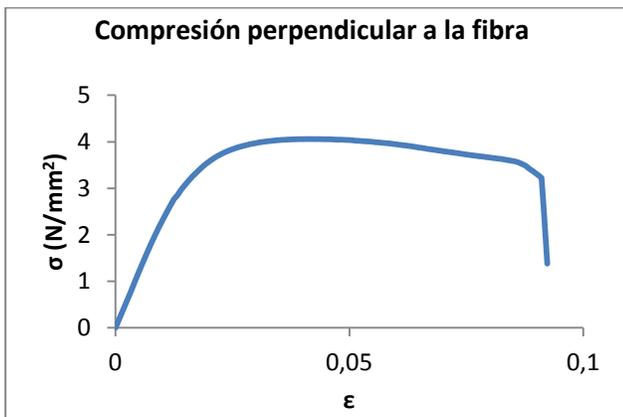


Fig. 1. Diagrama tensión deformación de la pieza CC3(27)a1.

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 transversal a las fibras. Se han obtenido las propiedades mecánicas asociadas a este tipo de sollicitación, se ha comprobado 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.



Fig. 2. Fotografía de la pieza CC3(27)a1 antes de la rotura.

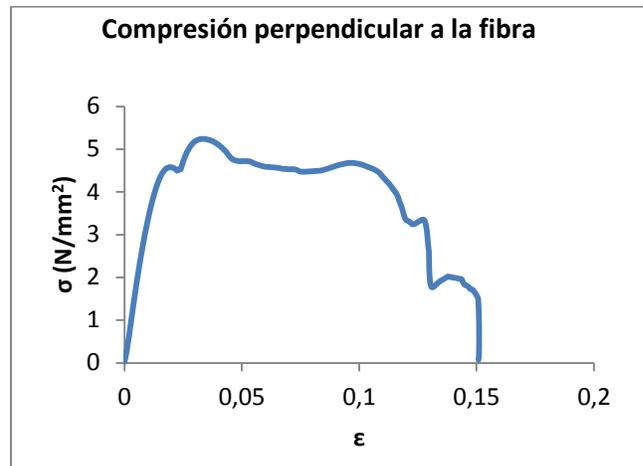


Fig. 3. Diagrama tensión deformación de la pieza CC1(27)a3.

## II. MATERIALES Y TÉCNICAS EMPLEADAS

Se han ensayado a compresión en sentido transversal a la fibra y hasta rotura 22 piezas de madera de pino silvestre de pequeña escuadría, de unas dimensiones aproximadas de 27 mm de espesor y 140 mm de altura. El ancho de las piezas ha sido muy variable y está comprendido entre 68 y 150 mm. Los ensayos se han realizado mediante prensa, controlando el desplazamiento a una velocidad de 0,3 mm/min. Todas las tablas ensayadas son ME1 según clasificación visual (AENOR, 2011) y les corresponde una clasificación mecánica C27 según norma (AENOR, 2010).

## III. RESULTADOS

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



Fig. 4. Fotografía de la pieza CC1(27)a3 antes de la rotura.

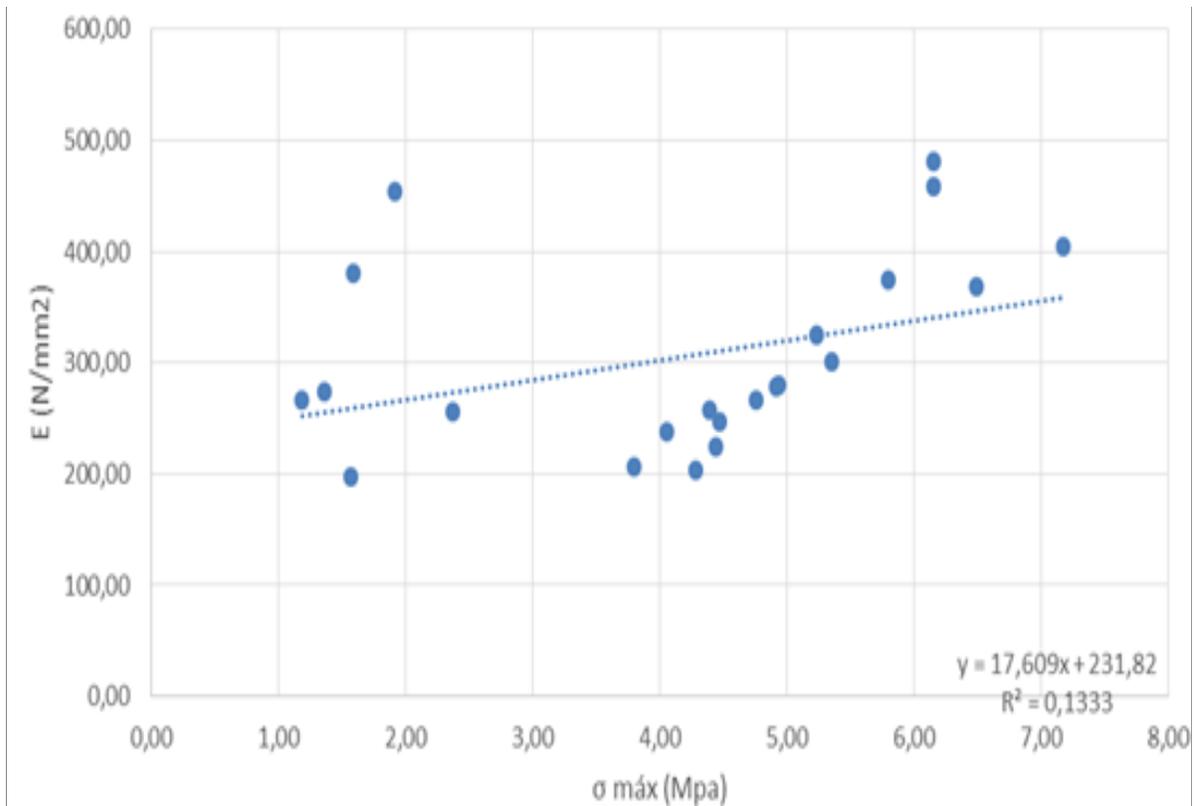


Fig. 5. Correlación entre el módulo de elasticidad y la tensión de rotura.

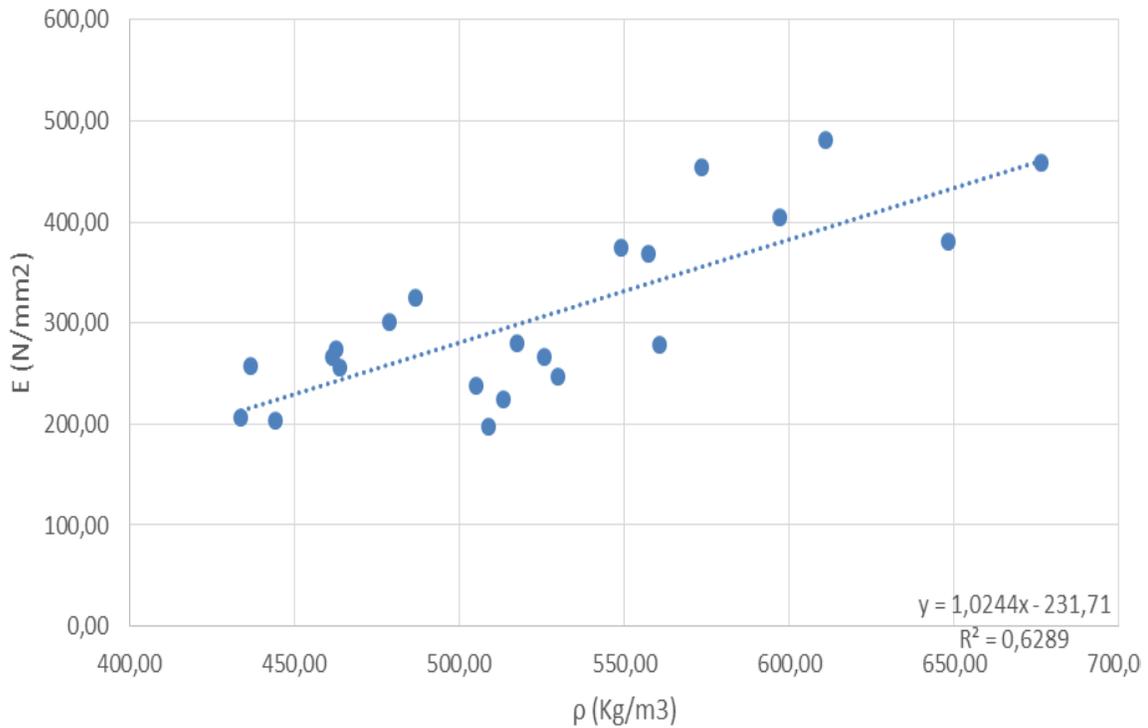


Fig. 6. Correlación entre el módulo de elasticidad y la densidad.

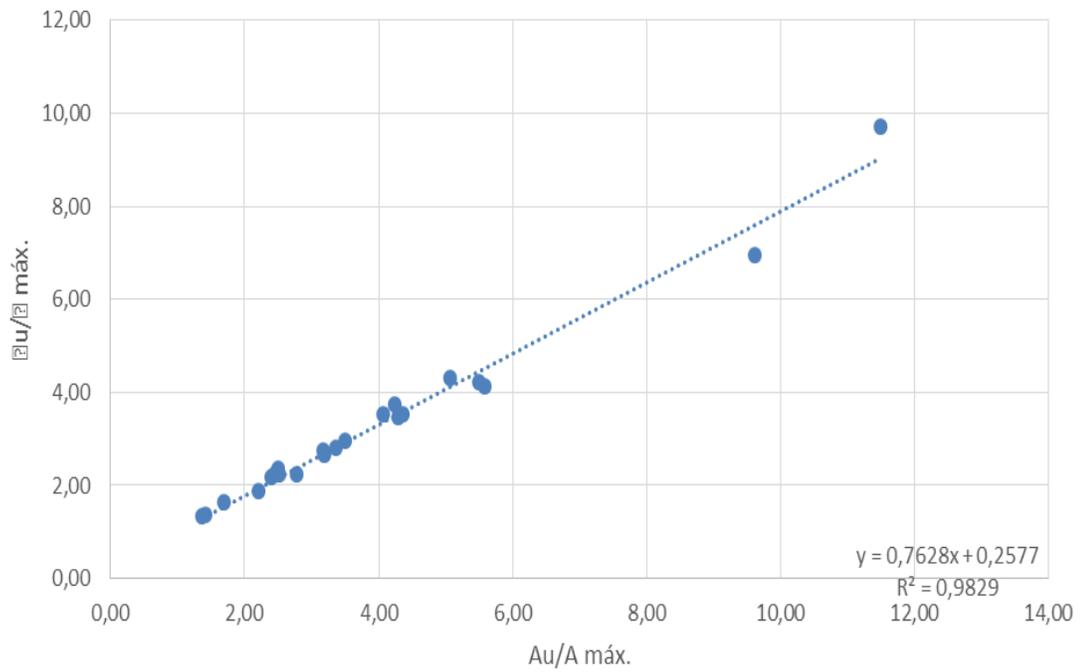


Fig. 7. Correlación entre la ductilidad en términos de deformación y la ductilidad en términos de energía

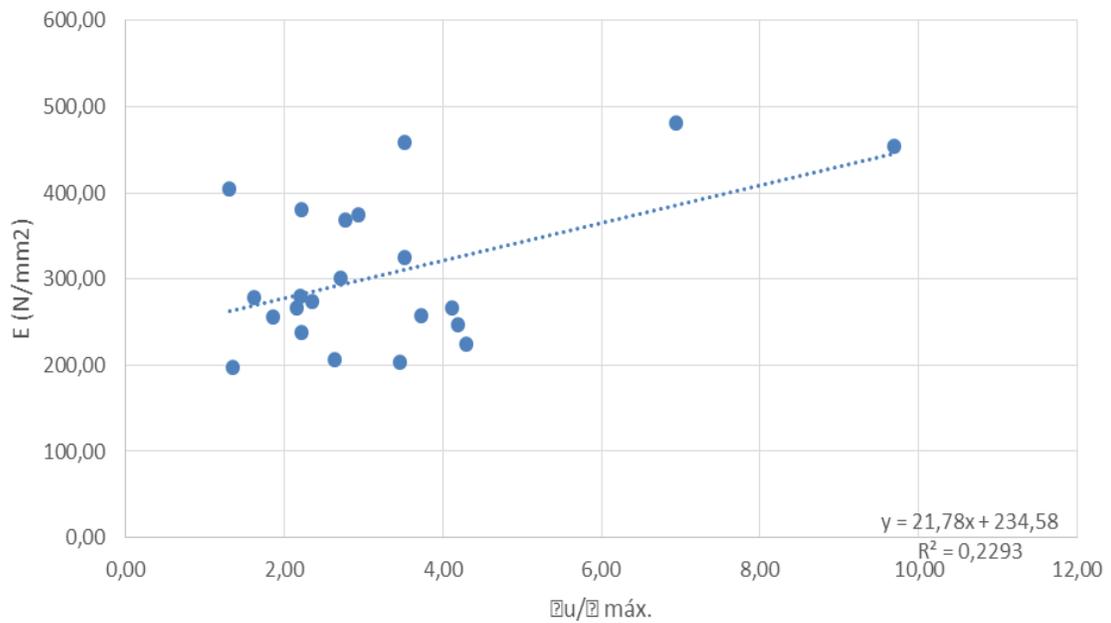


Fig. 8. Correlación entre el módulo de elasticidad y la ductilidad en términos de deformación.

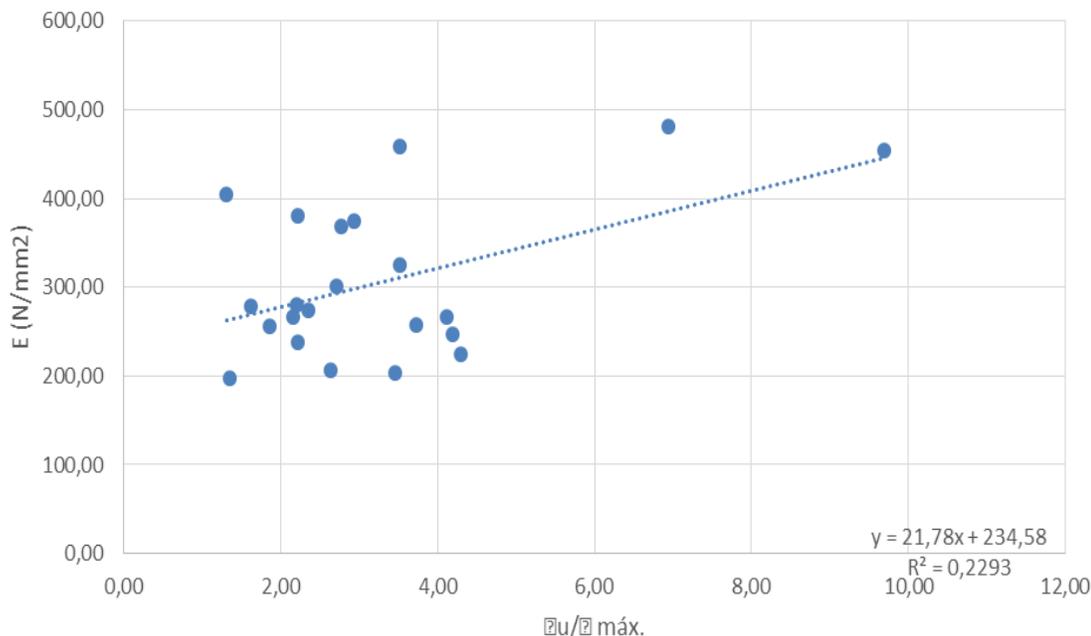


Fig. 9. Correlación entre el módulo de elasticidad y la ductilidad en términos de energía.

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 1 se indican los valores obtenidos para cada una de las piezas ensayadas junto a los correspondientes valores medios para cada propiedad obtenida.

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

La media de los valores de la tensión de rotura ha sido de 4,20 MPa, de los módulos de elasticidad 305,86 MPa y de la densidad 524,78 kg/m<sup>3</sup>. Si se comparan estos valores con los estimados por la norma UNE-EN 338 (AENOR, 2010), en función de la clasificación visual de la madera (2,6 MPa para la tensión de rotura, 380 MPa para el módulo de elasticidad y 450 kg/m<sup>3</sup> para la densidad), se puede afirmar que la utilización del sistema establecido por las normas UNE para estimar propiedades resistentes y físicas de la madera estudiada en este capítulo, apunta a una seguridad muy elevada cuando se estima la tensión de rotura (61%) y la densidad (17%), y por el contrario de una inseguridad cuando se estima el módulo de elasticidad (24%). Hay que observar que el valor de tensión de rotura indicado por la norma UNE-EN 338 (AENOR, 2010), es un valor característico que se ha comparado con el valor medio obtenido en los ensayos.

Por otra parte, el valor medio del módulo de elasticidad obtenido en los ensayos es prácticamente coincidente con el

que ya se indicaba hace decenios en la norma DIN 1052 en su versión vigente en 1978, que establecía un módulo de elasticidad de 300MPa para madera de conífera (Möhler et al., 1987).

#### B. Diagramas tensión deformación y forma de rotura

Este diagrama indica el comportamiento de un conjunto de piezas ensayadas. El primer tramo del diagrama es lineal y en él se ha calculado el módulo de elasticidad. Posteriormente el diagrama pierde la linealidad y la rigidez, alcanzando la carga máxima de ensayo para una deformación de un 41%. Posteriormente la carga necesaria para seguir deformando la probeta disminuye, pero no de forma importante, y la rotura se produce para grandes deformaciones (91,1%). Esto supone una ductilidad de la pieza de 2,22 medida en términos de deformaciones o de 2,53 medida en términos de densidad de energía de deformación.

En la figura 2 puede comprobarse el estado de deformación de la pieza instantes antes de la rotura. La pieza rompe por aplastamiento de la probeta y flexión con pandeo en el plano vertical.

En otros casos la rotura se produce por aplastamiento de una de las zonas de la pieza en contacto con los platos de la prensa de ensayo.

En la figura 3 se muestra el diagrama tensión deformación hasta rotura de la pieza CC1(27)a3. Se aprecia como el comportamiento de la pieza no es tan regular como en el caso anterior, apareciendo distintos escalones hasta que se produce la rotura.

TABLA II  
ECUACIONES DE LAS RECTAS DE REGRESIÓN Y COEFICIENTE DE CORRELACIÓN

| Variables  | Recta de Regresión       | R <sup>2</sup> |
|--|--------------------------|----------------|
| E - $\sigma_{\text{máx}}$                                  | $y = 17,609 x + 231,822$ | 0,133          |
| E - $\rho$   | $y = 1,024 x + -231,715$ | 0,629          |
| $\sigma_{\text{máx}}$ - $\rho$                             | $y = 0,009 x + -0,356$   | 0,105          |
| $\epsilon_u/\epsilon_{\text{máx}}$ - $A_u/A_{\text{máx}}$  | $y = 0,763 x + 0,258$    | 0,983          |
| E - $\epsilon_u/\epsilon_{\text{máx}}$                     | $y = 21,78 x + 234,58$   | 0,229          |
| E - $A_u/A_{\text{máx}}$                                   | $y = 16,956 x + 238,839$ | 0,235          |
| $\sigma_{\text{máx}}$ - $\epsilon_u/\epsilon_{\text{máx}}$ | $y = 0,012 x + 4,164$    | 0,000          |
| $\sigma_{\text{máx}}$ - $A_u/A_{\text{máx}}$               | $y = 0,05 x + 4,008$     | 0,005          |
| $\rho$ - $\epsilon_u/\epsilon_{\text{máx}}$                | $y = 7,812 x + 499,209$  | 0,049          |
| $\rho$ - $A_u/A_{\text{máx}}$                              | $y = 6,599 x + 498,693$  | 0,059          |

En la figura 4 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 deformación (3,52) o de energías (4,08) son algo superiores a los anteriores.

En elementos de mayor espesor, la rotura puede producirse por la división de la pieza, siguiendo los anillos de crecimiento, que se constituyen en superficies débiles de fractura debido a la escasa resistencia a la cohesión entre las distintas capas de la pieza (Lourenko et al., 2007).

### C. Correlaciones entre las variables mecánicas

A continuación se han obtenido las correlaciones entre las propiedades mecánicas estudiadas y sus correspondientes coeficientes. 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; densidad y ductilidad en términos de deformación; densidad y ductilidad en términos de energía.

En las figuras 5 a 9 se muestran, a modo de ejemplo, los gráficos que relacionan el módulo de elasticidad con las variables estudiadas y el gráfico que relaciona las dos formas de estudiar la ductilidad en este trabajo. En la tabla 2 se indica un resumen con las ecuaciones de todas las rectas de regresión y su coeficiente de correlación.

Los resultados obtenidos muestra que la relación entre el módulo de elasticidad y la densidad ha ofrecido buenos valores de correlación,  $R^2=0,63$  (figura 6 y tabla 2). En los

casos del análisis del módulo de elasticidad frente a la tensión de rotura y de la tensión de rotura frente a la densidad, los coeficientes obtenidos han sido muy bajos, 0,13 y 0,10 respectivamente, lo que indica que no se ha obtenido ninguna relación entre las variables analizadas.

La correlación entre la ductilidad medida en términos de deformación y en términos de energía es casi perfecta,  $R^2=0,98$  (figura 7 y tabla 2). Sin embargo no existe ninguna correlación entre el módulo de elasticidad, la tensión de rotura o la densidad frente a los valores de ductilidad medidos en términos de deformación o de energía (tabla 2).

### IV. CONCLUSIONES

Se han obtenido unos valores medios para la tensión de rotura y el módulo de elasticidad de 4,20 MPa y 305,86 MPa, respectivamente.

La comparación de los valores obtenidos con los estimados por el sistema de asignación de clases resistentes de las normas UNE indica que la norma busca la seguridad cuando se estiman los valores de tensión de rotura o de densidad y queda del lado de la inseguridad cuando se estima el módulo de elasticidad.

Todas las piezas rompen con grandes ductilidades antes del fallo.

Se ha obtenido un buen coeficiente de correlación entre el módulo de elasticidad y la densidad.

No existe ninguna correlación entre la tensión de rotura y la densidad ni entre la tensión de rotura y el módulo de elasticidad.

Existe una correlación prácticamente perfecta entre la ductilidad medida en términos de deformación y en términos de energía.

No existe ninguna correlación entre el módulo de

elasticidad, la tensión de rotura o la densidad frente a los valores de ductilidad medidos en términos de deformación o de energía.

#### REFERENCES

AENOR, UNE-EN 338 (2010). ERRATUM:2011. Madera estructural. Clases resistentes. Asociación Española de Normalización y Certificación. Madrid.

AENOR, UNE-EN 56544 (2011). Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas. Asociación Española de Normalización y Certificación. Madrid.

Argüelles, R., Arriaga, F. (1988). Curso de diseño y cálculo de estructuras de madera, COAM, Madrid.

Leijten, AJM., Jorissen, AJM., de Leijer, BJC (2012). The local bearing capacity perpendicular to grain of structural timber elements. *Construction and Building Materials* 27, 54-59.

Leijten, AJM., Larsen, HJ., Van der Put, TACM (2010). Structural design for compression strength perpendicular to the grain of timber beams. *Construction and Building Materials* 24, 252-257.

Lourenco PB, Feio AO, Machado JS (2007). Chestnut wood in compression perpendicular to the grain: Non-destructive correlations for test results in new and old wood *Construction and Building materials* 21, 1617-1627.

Möhler K, Natterer J, Götz KH, Hoor D. (1987). *Construire en bois*, Editions du Moniteur, París.



**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.