



Received: 26-02-2017

Accepted: 06-03-2017

Estudio comparativo entre valores característicos experimentales y normativos de madera aserrada de pino silvestre

Comparative study between experimental and normative values of sawnwood of wild pine

Enrique Gómez de la Peña; Alfonso Cobo Escamilla; Rafael Lozano Díez, Oscar López Zaldívar

Universidad Politécnica de Madrid(enrique.arquitectura@gmail.com; alfonso.cobo@upm.es; rafaelvicente.lozano@upm.es; minetra@gmail.com)

Resumen— Este trabajo realiza un estudio comparativo de caracterización de vigas de madera aserradas y su comparación con la normativa. Para ello se ha utilizado dos tipos de madera muy diferentes, una muy heterogénea, con gran número de defectos, y otra muy homogénea, para comprobar la influencia de los nudos en el comportamiento mecánico de la madera. Para ello se han ensayado un total de 18 vigas de madera y 5 probetas a compresión. Posteriormente se ha realizado una comparativa con la normativa de caracterización, para comprobar su grado de definición. Se ha podido comprobar que dicha norma, se encuentra en el lado de la seguridad en el ámbito de las resistencias, pero que su definición es escasa en cuanto al módulo de elasticidad de la madera.

Palabras clave— Madera; UNE-338; vigas.

Abstract- This work makes a comparative study of the characterization of sawn timber and its comparison with the standard. For this purpose, two very different types of wood have been used, one very heterogeneous, with a large number of defects, and a very homogeneous one, to verify the influence of the knots on the mechanical behavior of the wood. To this end, a total of 18 wooden beams and 5 test specimens have been tested. Subsequently a comparison has been made with the standardization of characterization, to verify its degree of definition. It has been possible to verify that this norm, is in the side of the security in the field of the resistances, but that its definition is scarce as far as the modulus of elasticity of the wood.

Index Terms— Wood; UNE-338; beams.

Enrique Gómez de la Peña es alumno de doctorado de la ETS de Edificación de la Universidad Politécnica de Madrid.

Alfonso Cobo Escamilla es catedrático y director de la ETS de Edificación de la Universidad Politécnica de Madrid.

Rafael Lozano Díez es profesor asociado del departamento de Tecnología de la Edificación de la ETS de Edificación de la Universidad Politécnica de Madrid.

Oscar López Zaldívar es profesor asociado del departamento de Tecnología de la Edificación de la ETS de Edificación de la Universidad Politécnica de Madrid.

I. INTRODUCCIÓN

La madera es un material fibroso de origen vegetal, cuyo uso en el ámbito de la construcción está muy extendido. Se trata un material heterogéneo y anisótropo, cuyo comportamiento mecánico, depende en gran medida de la disposición de sus fibras, la cual determina su densidad (Steffen et al., 1997), y de sus defectos, respondiendo a la teoría del eslabón más débil (Pierce, 1926; Tucker, 1927; Weibull, 1939).

En cuanto a sus propiedades físicas destacar su higroscopicidad, ya que tiende a equilibrar su contenido de humedad con el ambiente, y este, va a marcar el comportamiento mecánico de la madera, afectando en mayor medida a la compresión paralela a la fibra (Toratti, 1992; Ranta, 2003; Mårtensson, 1992).

Su comportamiento a compresión es diferente al de tracción. En tracción la madera tiene un comportamiento elástico-lineal hasta la rotura, mientras en compresión tiene una fase inicial elástica hasta que empieza a plastificar hasta el fallo final (Baño et al., 2012; Argüelles, 2000; Calderoni et al., 2006). Esta diferencia de comportamientos condiciona la respuesta a flexión del material, donde generalmente el fallo se produce por la rotura de las fibras inferiores (tracción).

La capacidad a cortante de una viga de madera podría basarse en la capacidad de carga de la misma. Para determinar la resistencia a cortante de una viga mediante un ensayo de flexión es precisa una disposición de poca esbeltez (relación luz/canto de la viga menor o igual a 5) (Esteban et al., 2010). Aun así, la presencia de defectos, principalmente en la cara traccionada de la viga, marcará significativamente el modo de rotura, haciendo que esta se produzca en la mayoría de los casos por flexión o una combinación entre flexión y cortante,

de difícil definición debido a la heterogeneidad del material, por lo que, un aumento de la calidad producirá un aumento de las probabilidades de que el fallo se produzca por cortante (Íñiguez, 2007).

Los elementos estructurales de madera son diseñados normalmente mediante métodos de cálculo elástico-lineales tanto para la capacidad de carga del elemento como el cálculo de la sección. Este es el único método de cálculo para madera recomendado por el Eurocódigo 5 (UNE-1995, 2010). Se dispone de numerosa normativa que acota la madera tanto física como mecánicamente, donde destaca la UNE-EN 56.544 (UNE-56, 2011) que acota morfológicamente la madera para su aceptación o rechazo para su uso estructural, la UNE-EN 1.912 (UNE-1912, 2012), que asigna las diferentes clases resistentes en función de la calidad de la madera en función de su asignación por la UNE-EN 56.544 (UNE-56, 2011), y la UNE-EN 338 (UNE-338, 2010) que define las propiedades mecánicas de las diferentes clases resistentes, las cuales se tomarán como valores de referencia a la hora de realizar los procesos de cálculo estructural. A pesar de ser numerosos los requerimientos de la normativa para la definición de la madera estructural, no se cuenta con estudios que comparen los valores legislativos con valores experimentales para comprobar el grado de definición de la normativa, lo cual resulta altamente interesante debido a la cantidad de factores que determinan las propiedades mecánicas.

En este estudio se realiza una caracterización mecánica de dos tipos de maderas diferentes, una de alta calidad, carente de defectos, y otra muy heterogénea, y los resultados se comparan con los valores de las normas, para comprobar su grado de definición.



Fig. 1. Viga B05, del pinar de Valsaín, de calidad 4ª, utilizada para la caracterización a flexión.



Fig. 2. Viga B202, procedente de Soria, de calidad 1ª, utilizada para la caracterización a flexión.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Materiales empleados

Para la caracterización de la madera a flexión se dispone de 13 vigas de madera aserrada de Pino Silvestre de 1090x155x79±3, procedentes del pinar de Valsaín en Segovia, de calidad 4ª con un gran número de defectos en las caras, por otro lado, se dispone de otras 5 vigas de Pino Silvestre, procedentes de Soria, de 100 x 100 x 46 mm (Fig. 1) para la realización de los ensayos de flexión. Para la caracterización mecánica a compresión de la madera se utilizaron 5 piezas de 40x40x240, de la misma madera de las vigas procedentes de Soria.



Fig. 3. Probeta C-01, de madera procedente de Soria, utilizada para la caracterización de la madera a compresión.

Las vigas fueron clasificadas visualmente según la norma UNE 56.544 (UNE-56, 2011), posteriormente se les asignó la clase resistente en base a la norma UNE EN 1.912:2012 (UNE-56, 2011), y por último se obtuvieron los valores de caracterización mecánica según la norma UNE-EN: 338 (UNE-338, 2010), los cuales se pueden observar en la Tabla 1.

B. Programa experimental

El comportamiento a flexión de las vigas procedentes de Valsain se caracterizó a través de los ensayos de flexión en 4 puntos y 3 puntos realizados en la prensa hidráulica modelo MIB60 y el software informático WINTEX 32, ambos de Ibertest, según la configuración mostrada en la Fig. 4 y la Fig. 5. Se realizaron estos dos tipos de ensayo para observar el cambio de comportamiento de las vigas según la configuración de ensayo. La elección de las piezas para cada ensayo fue aleatoria y se puede observar en la Tabla 2.

Las vigas de calidad 1ª procedentes de Soria se ensayaron a flexión en 4 puntos según la configuración mostrada en la Fig. 6.

Previo a la realización de los ensayos a flexión hasta rotura a todas las vigas se les realizaron 3 precargas de 6 kN para el acoplamiento de las fibras internas y el cálculo del módulo de elasticidad en la última de las precargas entre los 4 y los 6 kN, garantizando de este modo que las vigas se encontraban dentro de su fase elástica.

El valor de la máxima tensión alcanzada en la viga (tensión de rotura) se ha obtenido suponiendo que el material tiene un comportamiento elástico y lineal, tal como se admite en el Eurocódigo 5 (UNE-1995, 2010), a partir de la expresión (1)

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{W_e} = \frac{M_{max}}{b \cdot h^2 / 6} \quad (1)$$

donde M_{max} es el máximo momento flector alcanzado por la viga, W_e es el momento resistente elástico de la sección, b es el ancho de la sección y h es la altura de la sección.

III. RESULTADOS

A. Caracterización física

Después del proceso de desecado en estufa a una temperatura de $103 \pm 3^\circ\text{C}$, las probetas procedentes de la madera Valsain, obtuvieron un contenido de humedad medio del 9,3% y la densidad de 522,69 kg/m³. Esto indica que las vigas se encuentran 2,7 puntos por debajo del contenido medio de humedad de referencia marcado por la normativa en el 12%. El contenido de humedad medio de las piezas de madera procedente de Soria fue del 8,4 %, y la densidad de 509,20 kg/m³. En esta ocasión se encontró un 3,6% por debajo del contenido de referencia.

B. Caracterización mecánica

Vigas de Pino silvestre procedentes del pinar de Valsaín

TABLA I
VALORES CARACTERÍSTICOS DE LA CLASE RESISTENTE C22 Y C27 OBTENIDOS DE LA NORMA UNE-EN 338

CLASE RESISTENTE	Resistencia a Flexión (N/mm ²)	Resistencia a tracc. Paralela a la fibra (N/mm ²)	Resistencia a comp. Paralela a la fibra (N/mm ²)	Resistencia a cortante (N/mm ²)	Densidad media (Kg/m ³)
C22	22	13	20	3,8	410
C27	27	16	22	4,0	450

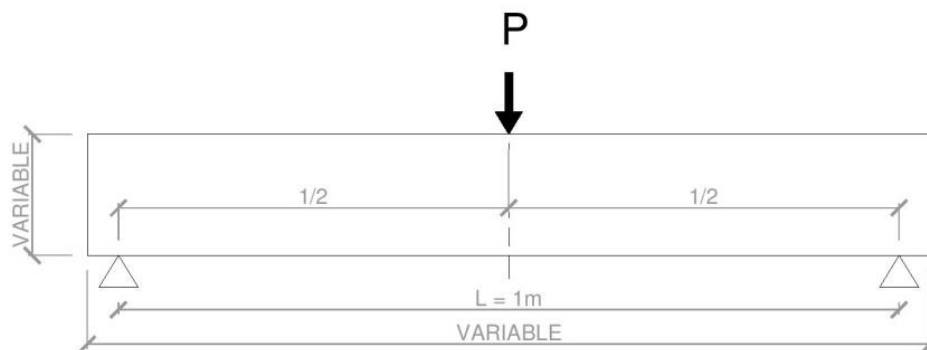


Fig. 4. Esquema de ensayo a flexión en 3 puntos a vigas procedentes del Pinar de Valsain.

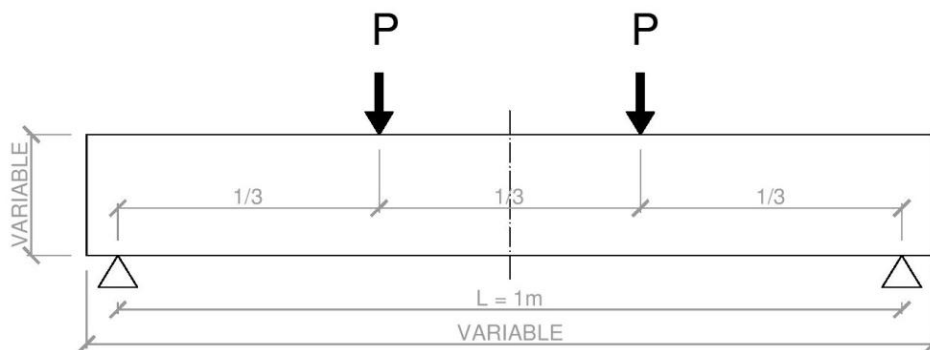


Fig. 5. Esquema de ensayo a flexión en 4 puntos a vigas procedentes del Pinar de Valsain.

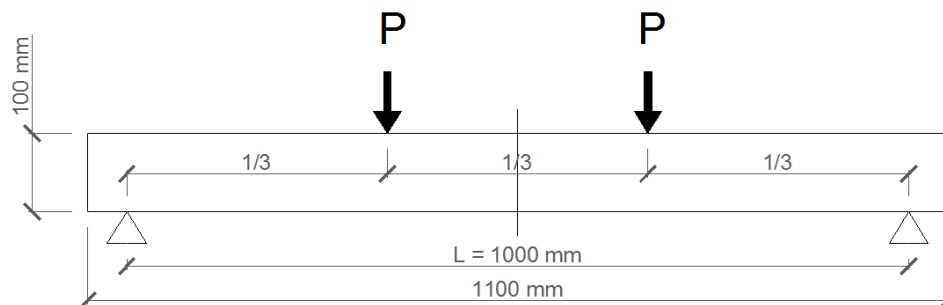


Fig. 6. Esquema de ensayo a flexión en 4 puntos a vigas procedentes de Soria.

En la Fig. 7, en la Fig. 8 y en la Tabla 3, se muestran los resultados de los ensayos, donde se observa la gran variabilidad de respuesta debido a la gran heterogeneidad de la madera. Aun así hay una clara diferenciación entre las piezas aceptadas y rechazadas por la norma UNE 56.544 de clasificación visual. Los rechazados tienen una resistencia media de 17,6 MPa y las piezas aceptadas por la norma rompen a los 38,8 MPa de media.

En todos los casos las piezas se dispusieron de la forma más beneficiosa para el ensayo, por lo que los defectos de mayor tamaño se situaron en la cara comprimida.

Vigas de Pino silvestre procedentes de Soria

Se trata de una madera de alta calidad, sin defectos

aparentes, que rompe principalmente a flexión de un modo frágil, denotando en algunos casos componente de cortante, sin ser el motivo principal de la rotura. Los valores de resistencia y desplazamiento se pueden ver en la Tabla 3 y en la Fig. 9.

Tras los ensayos se ha obtenido un valor medio de resistencia a flexión de 65,0 MPa y una carga de 29,9 kN.

Resistencia a compresión

Se ensayaron 5 probetas a compresión de 40 mm x 40 mm x 240 mm, de la misma madera que las vigas procedentes de Soria, siguiendo las indicaciones de la norma de caracterización UNE-EN 408:2011 (UNE-408, 2011) “Estructuras de madera. Determinación de algunas

TABLA II
CONFIGURACIÓN DE ENSAYOS DE VIGAS PROCEDENTES DEL PINAR DE VALSAÍN

Viga	Ensayo de flexión		Viga	Ensayo de flexión	
	3 puntos	4 puntos		3 puntos	4 puntos
B01		X	B11		X
B02	X		B13		X
B05	X		B14		X
B06		X	B15		X
B07		X	B17		X
B09		X	B20	X	
B10	X				

propiedades físicas y mecánicas”. En la Tabla 4 y en la Fig. 10 se pueden ver los resultados mecánicos obtenidos durante el ensayo. En la primera columna se muestra la máxima resistencia alcanzada por la probeta; en la segunda columna se muestra el desplazamiento en el momento de máxima resistencia, y en la tercera el desplazamiento último de la probeta, considerado cuando este como el momento en el cual la probeta alcanza el 90% de su resistencia máxima, encontrándose en su fase descarga (plastificación).

La rotura vino producida por aplastamiento de fibras en la zona central de la sección de las probetas, exceptuando la probeta C03, donde dicho aplastamiento se produjo en la base de la probeta (Fig. 10). La localización de esta rotura hizo que no se produjese ningún plano de deslizamiento, como así ocurrió en las demás probetas, por lo que la plastificación de la rotura fue más paulatina, prolongando el fallo final de la sección

IV. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

A. Vigas procedentes del pinar de Valsaín (Segovia). Madera

heterogénea

Se trata de una madera muy heterogénea con numerosos defectos en sus caras. La densidad media obtenida es de 526 Kg/m³ y el contenido de humedad del 9,3%. Estos datos confirman los valores de referencia marcados por otros autores, por lo que la piezas objeto de estudio pueden ser aceptadas como características de su especie, siendo adecuadas para poder dar unos resultados representativos de las propiedades de la especie.

El número de rechazos es elevado respecto del montante total de piezas (38%). El principal motivo es la presencia de nudos en alguna de las caras, principalmente en la superior e inferior. A pesar de ser un número elevado, los resultados obtenidos de resistencia de las piezas justifica dicho rechazo por la UNE-EN 56.544 ya que la resistencia se reduce en un 35% de media en las piezas ensayadas a flexión en 3 puntos, y en un 58% en las ensayadas a flexión en 4 puntos.

Cabe resaltar que la disposición de los defectos que provocan el rechazo por la normativa es clave en la respuesta de la viga, como es el caso de la pieza B02, la cual, se dispuso

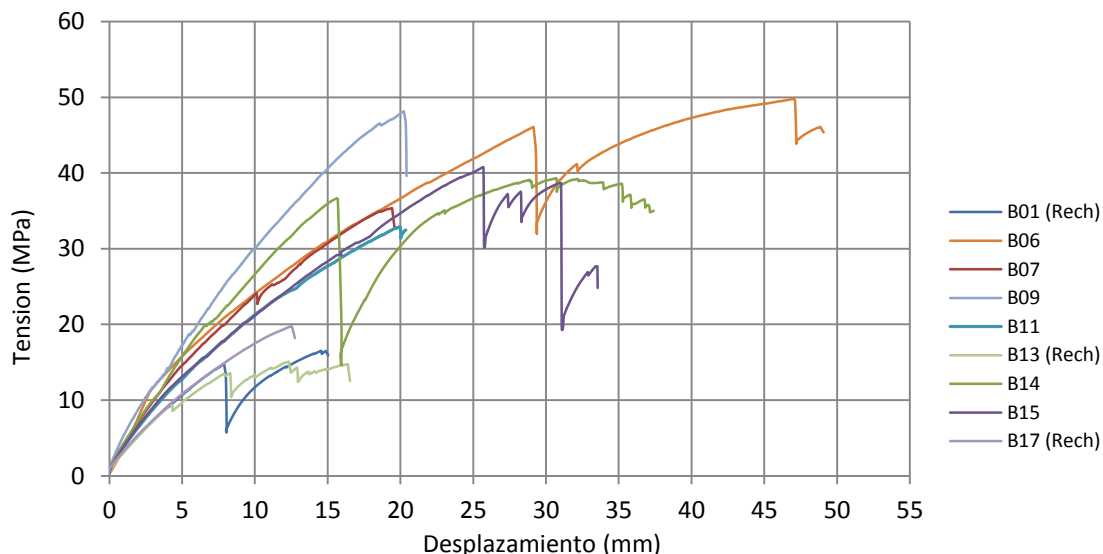


Fig. 7. Ensayos a flexión en 4 puntos a vigas procedentes del pinar de Valsaín.

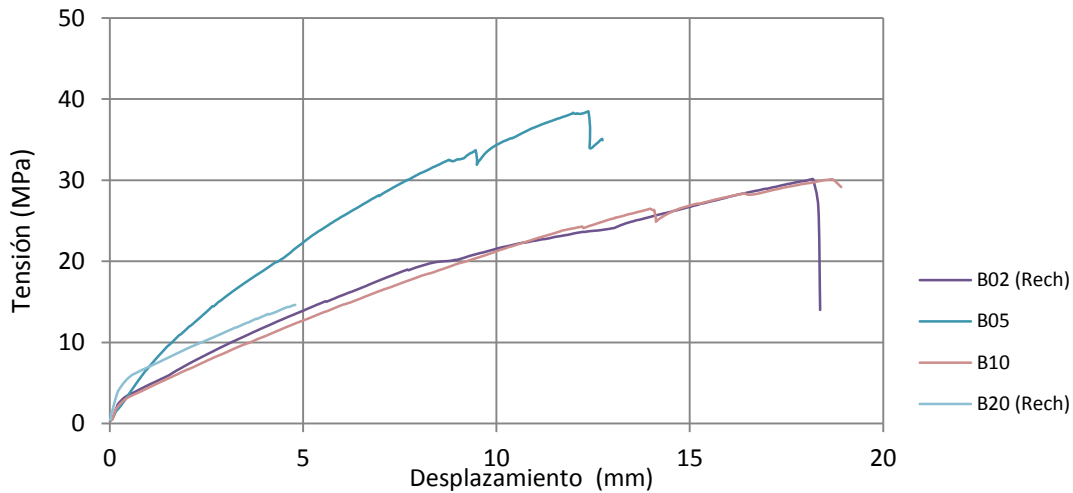


Fig. 8. Ensayos a flexión en 3 y 4 puntos a vigas procedentes del pinar de Valsáin.

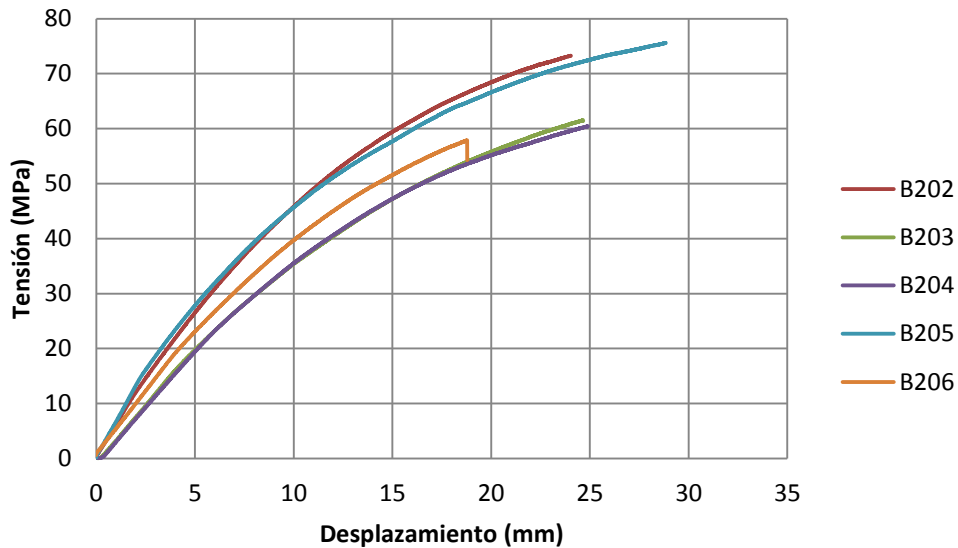


Fig. 9. Diagrama Tensión - Desplazamiento obtenido durante la realización del ensayo a flexión en 4 puntos a vigas sin reforzar.

TABLA III
RESULTADOS DE VIGAS ENSAYADAS A FLEXIÓN PROCEDENTES DEL PINAR DE VALSAÍN

VIGA	Clase resistente	Resis. última flexión (MPa)	Desp. máx. (mm)	MOEG (MPa)	Tipo de rotura	Comentario
Aceptadas	C-22	38,8	27,3	3.794	Cortante	
Rechazos	-	17,6	15,7	2.452	Flexión	Presencia de nudo
Media		30,7	22,9	3.278		

el nudo que ocupaba toda su sección y motivaba el rechazo de la misma por la norma en la cara comprimida a la hora del ensayo. La respuesta mecánica fue muy similar a la de la pieza B10, alcanzando resistencias muy parejas.

A pesar de que la madera a flexión no tiene un modo de rotura claro en todos los casos, los ensayos realizados se pueden englobar en 2 grupos diferenciados, independientemente del modo de aplicación de la carga:

TABLA IV
RESULTADOS DE VIGAS ENSAYADAS A FLEXIÓN EN 4 PUNTOS PROCEDENTES DE SORIA

VIGA	Clase resistente	Resis. última flexión (MPa)	Desp. máx. (mm)	MOEG (MPa)	Tipo de rotura
Media	C-27	65,0	27,8	7.850	Cortante

- Roturas a flexión: compuesto principalmente por elementos rechazados por la norma de clasificación visual.
- Roturas a cortante (rasante): compuesto por piezas aceptadas por la norma.

Las roturas de forma rasante se han producido porque la sección de la pieza no ha sido capaz de soportar los esfuerzos de cortante en la dirección de las fibras (Fig. 11), siendo la lignina y la hemicelulosa de conformación del tronco las que tienen que soportar dicho esfuerzo y cuya resistencia es muy baja. De este modo queda marcado que la resistencia a cortante paralela a la fibra es donde la madera tiene menor capacidad de carga.

Las roturas a flexión han venido provocadas claramente por defectos en la cara de las piezas, que suponen un corte de las fibras longitudinalmente y por lo tanto un punto débil (Fig. 12). Esto ha sido debido a que los nudos son quebradizos a tracción, por lo que la disposición de los mismos en la cara traccionada, o cerca de ella, ha supuesto la pérdida de sección efectiva trabajando a tracción, produciendo una rotura prematura de la pieza. Este desajuste entre la resistencia a tracción y a flexión ha provocado que no se produzca ninguna interfaz crítica en la cual, los esfuerzos a cortante paralelos a

la fibra de la pieza rompan esta.

En cuanto a la resistencia de las vigas, como se observa en la Tabla 4, las resistencias a flexión obtenidas experimentalmente corresponderían a unas clases resistentes muy superiores a la establecida por la clase C-22, a pesar de las diferencias entre la flexión en 3 y 4 puntos sean considerables, encuadrando la madera como C-30 y C-40 respectivamente.

Los resultados de resistencia a cortante muestran valores discrepantes, siendo superiores en flexión en 4 puntos e inferiores en 3 puntos respecto de la clase resistente de referencia.

En cuanto al módulo de elasticidad obtenido, no se ve representado por ninguno de los definidos por la normativa. La densidad tampoco correspondería con su clase resistente.

Por todo esto se considera que, partiendo de la norma UNE-EN 1912:2012 no se debería encuadrar a toda la madera de la clase MEG (Madera Estructural, Gruesa Escuadria), con la misma clase resistente, ya que los valores de resistencia a flexión, son muy superiores a los de la clase C-22. Del mismo modo, se remarca el bajo grado de definición de los valores característicos de dicha madera, debido a la discrepancia de resultados o la no representación de los mismos, como es el

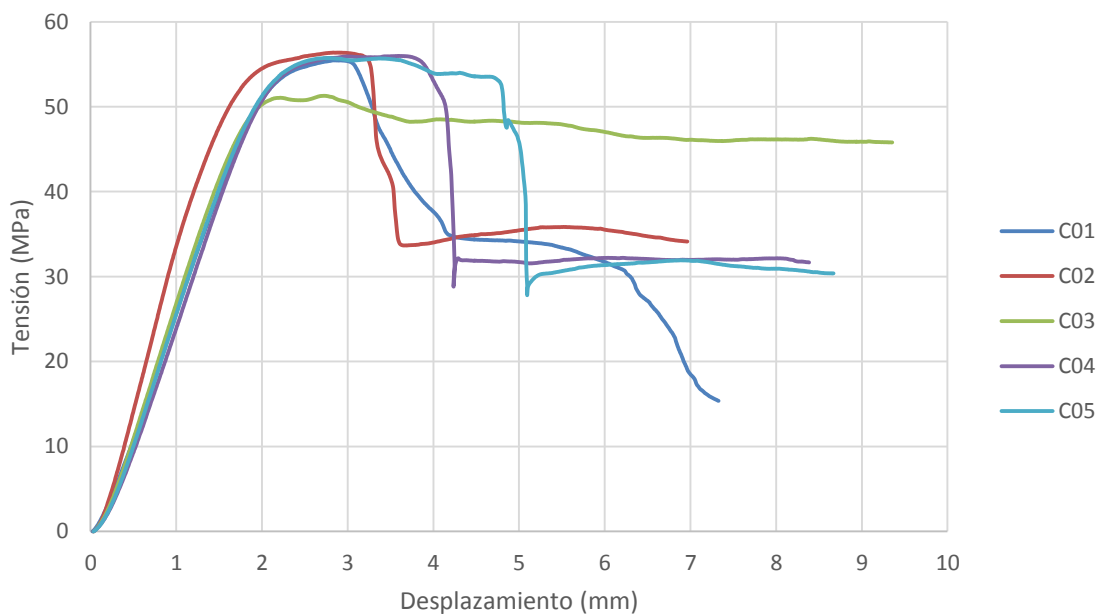


Fig. 10. Diagrama Tensión - Desplazamiento obtenido durante la realización del ensayo a compresión a probetas de madera de Pino Silvestre procedente de Soria.

caso del Módulo de Elasticidad a flexión.

B. Vigas procedentes del pinar de Valsaín (Segovia). Madera de 1ª calidad

La madera utilizada para el estudio se trata de una madera de calidad 1ª, de la especie *Pinus Silvestris*, procedente de Soria (España). Se trata por lo tanto de una madera muy homogénea, carente de defectos significativos, que tiene una respuesta mecánica con pocas variaciones en comparación con maderas que dispongan defectos.

TABLA V
RESULTADOS DE PROBETAS DE MADERA DE PINO SILVESTRE ENSAYADAS
A COMPRESIÓN

Probeta	Resistencia Max. (Mpa)	Desp. maxima Resistencia (mm)	Desp. último (mm)
C01	55,46	2,92	3,28
C02	56,37	2,82	3,30
C03	51,28	2,71	6,89
C04	55,97	3,64	4,13
C05	55,74	2,78	4,82
MEDIA	54,96	2,97	4,48

La densidad obtenida en los ensayos de 509,20 Kg/m³, la cual resulta característica de su especie que se encuadra entre los 400 - 550 Kg/m³.

En cuanto a la resistencia a flexión de la madera utilizada, se observó una menor variación entre la resistencia mecánica y

la capacidad de desplazamiento comparada con las vigas procedentes de Valsaín. Esto es debido a que la madera es más homogénea y no tiene grandes defectos que producen un corte de la continuidad de las fibras. La variación entre la pieza de mayor resistencia (B205 = 75,6 MPa) y la de menor resistencia (B206 = 54,3 MPa) fue de un 28,2%. Esta cifra, aun siendo mucho menor que la de la madera de Valsaín, destaca la heterogeneidad del material, la cual debe de ser tenida muy en cuenta a la hora de realizar cualquier cálculo para un uso estructural.

En este caso, el modo de rotura de todas las vigas fue a flexión con comportamiento frágil, bien por el centro del vano, bien a la altura de alguno de los apoyos centrales.

La resistencia a flexión obtenida experimentalmente es un 140,7 % superior a la indicada por la norma, como se puede observar en la Tabla 5, por lo que se destaca el lado de la seguridad en el cual se encuentra la normativa en este apartado, quedándose muy por debajo de la resistencia real de la madera utilizada. Este hecho debe ser considerado ya que, aun con la variabilidad de resultados obtenidos en resistencia, la viga B206, que obtuvo los valores más bajos de resistencia a flexión, alcanzó un resultado por encima del doble del indicado para la clase C27.

La resistencia a cortante se acercó más a lo marcado, quedándose un 21,9% por encima de los 4,0 MPa indicados (Tabla 5). Aun así fue un valor superior, quedando del lado de la seguridad. En este caso, se remarca la poca especificación de la norma, ya que marca el mismo valor de resistencia a



Fig. 11. Viga B10 con fallo producido cortante.



Fig. 12. Viga B13 con fallo producido a flexión.

COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE ENSAYOS EXPERIMENTALES Y VALORES DE REFERENCIA SEGÚN EL MARCO LEGISLATIVO DE VIGAS A FLEXIÓN DE PINO SILVESTRE PROCEDENTE DE VALSAÍN

	Valores de caracterización				
	Experimentales		C-22	Clase con valores más cercanos	
	3 puntos	4 puntos		3 puntos	4 puntos
Resistencia a flexión (MPa)	32,4	41,0	22	C 30 (30)	C 40 (40)
Resistencia a cortante (MPa)	2,5	4,8	3,8	< C14 (3,0)	> C24 (4,0)
E paralelo a la fibra (MPa)	-	-	10.000	< C14 (7.000)	< C14 (7.000)
E perpendicular a la fibra (MPa)	-	-	330	> C50 (330)	> C50 (330)
E a flexión (Mpa)	3.794		-	-	
Densidad media (Kg/m³)	526,36		410	C-45 (520)	

cortante (4,0 MPa) desde la clase resistente C24, hasta la clase C50.

C. Resistencia a compresión de la madera procedente de Soria

TABLA VII

COMPARATIVA ENTRE RESULTADOS EXPERIMENTALES, CLASE RESISTENTE C27 Y OTRAS CLASES RESISTENTES DE LA NORMA UNE-EN 338 DE LA CARACTERIZACIÓN A FLEXIÓN REALIZADA A VIGAS DE PINO SILVESTRE PROCEDENTE DE SORIA

	Resis. última flexión (MPa)	Resis. Última cort. (Mpa)	Densidad (Kg/m ³)
C27	27,0	4,0	450
MEDIA EXP.	65,0	4,9	509
% MEDIA EXP. - C27	140,7	21,9	13,1
CLASE RESISTENTE EQUIVALENTE	> C50	C24 - C50	C40

El diagrama obtenido en el ensayo de caracterización mecánica a compresión coincide con los modelos marcados por Calderoni y Argüelles (Argüelles, 2000; Calderoni et al., 2006) donde se puede observar claramente que la madera empleada pasa por una fase primera elástica y lineal, una segunda fase elastoplástica y una tercera fase de fluencia hasta que se produce su rotura final. Dependiendo del lugar de la rotura, se ha comprobado que la respuesta final puede ser muy diferente, aquellas piezas que rompieron por el centro del vano, crearon un plano de deslizamiento por el cual se agotó la sección, produciendo un descenso repentino de la resistencia a causa del deslizamiento del plano (Fig. 9) o, incluso una separación de las fibras en su dirección paralela. En el caso de la pieza C03, la rotura vino cerca de la interfaz inferior probeta-plato de la prensa. La pieza, al no contar con dicho plano de deslizamiento, fue aplastando sus fibras hasta agotar la sección. Como se puede observar, la fase de plastificación de la probeta fue muy paulatina, evitando que se produjese un

colapso repentino

Se destaca por lo tanto la importancia de la localización de la rotura, que, en el caso de producirse en un lugar donde las fibras están libres de confinamiento lateral, se produce un agotamiento de la sección más repentino que en aquellos casos en los que las fibras se van fracturando poco a poco desde los extremos hacia el centro de la probeta.

Para la comparación de resultados experimentales con los normativos se contrastaron los valores aportados por la normativa de caracterización UNE-EN 338 para la clase resistente C27 y los valores obtenidos experimentalmente. Una vez se obtuvieron estos, a la resistencia media se le aplicó el coeficiente de reducción marcado por la norma UNE-EN 384: "Madera Estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad" a través de la expresión (2).

$$f_{c,0,k} = 5 (f_{m,k})^{0,45} \quad (2)$$

Como se observa en la Tabla 8 los resultados experimentales están un 149,8 % por encima de los marcados por la norma en resistencia. Incluso, aplicándole el factor de reducción de la norma UNE-EN 384 (UNE-384, 2010), el cual es muy restrictivo, el resultado es muy superiores, por lo tanto, se destaca el lado de la seguridad de la norma en cuanto a resistencia a compresión. Si se compara con los valores de las diferentes clases resistentes aportadas, en ambos casos estaríamos por encima de los valores marcados por la clase C50, que es la mayor de las indicadas por la UNE-EN 338.

Sin embargo, el módulo de elasticidad se encuentra un 29,8 % por debajo del indicado para la clase C-27, siendo equivalente al indicado para la clase resistente C16. En este caso, se destaca que la norma se encuentra del lado de la inseguridad.

V. CONCLUSIONES

Los valores de resistencia a flexión de las piezas aceptadas por la norma obtenidos experimentalmente, están muy por

encima de los estipulados por la UNE-EN 338, por lo que se destaca el lado de la seguridad de la norma en este aspecto.

Los criterios de aceptación de la norma UNE-EN 56.544:2011 están correctamente trazados en base a la morfología de los defectos, pero deberían incluir la localización de los mismos en los criterios de aceptación.

La norma UNE-EN 338:2010, carece de un Módulo de Elasticidad representativo de la resistencia a flexión de la madera.

La presencia de defectos merma y condiciona en gran medida la resistencia a flexión de la madera, provocando en el caso de los especímenes ensayados dos modos de rotura en aquellas vigas con una gran escuadría, obteniendo:

- Flexión: en aquellas vigas que presentan defectos en su cara traccionada.
- Cortante: en aquellas vigas que no presentan defectos significativos, seccionado las piezas mediante un modo de rotura rasante.

La ausencia de defectos reduce la heterogeneidad de la madera, aunque no llega a eliminarla por completo, demostrando que afecta en mayor medida en los esfuerzos de tracción que de compresión.

REFERENCIAS

- Argüelles, R., Arriaga, F., Martínez, J.J. (2000). "Estructuras de madera. Diseño y cálculo" (Segunda edición ed.). Madrid: AITIM.
- 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*, Vol. 62, pp. 269-284.
- Calderoni, C., De Matteis, G., Giubileo, C., Mazzolania, F. M. (2006). "Flexural and shear behaviour of ancient wooden beams: Experimental and theoretical evaluation". *Engineering Structures*, Vol. 28, pp. 729-744.
- Esteban, M., Arriaga, F., Íñiguez, G., Bobadilla, I., Mateo, R. (2010). "Influencia de las fendas en la resistencia de la madera estructural". *Materiales De La Construcción*, Vol. 60, pp. 115-132.
- Íñiguez, G. (2007). "Clasificación mediante técnicas no destructivas y evaluación de las propiedades mecánicas de la madera aserrada de coníferas de gran escuadría para uso estructural". Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, ETS de Ingenieros de Montes. p. 223.
- Mårtensson, A. (1992). "Mechanical behaviour of wood exposed to humidity variations". Lund Sweden: Lund Institute of Technology. (Report TVBK-1006. Ph.D. thesis).
- Pierce, F.T. (1926). "Tension tests for cotton yarn". *Journal of the Textile Institute*, pp. 155-368.
- Ranta-Maunus, A. (2003). "Effects of climate and climate variations on strength". Thelandersson S, Larsen HJ, Editors. *Timber Engineering*, (Chichester: John Wiley & Sons Incorporated).
- Steffen, A., Johansson, C.J., Wormuth, E.W. (1997). "Study of the relationship between flatwise and edgewise moduli of elasticity of sawn timber as a means to improve mechanical strength grading technology", *Holz Als Roh-Und Werkstoff*, Vol. 55, pp. 245-253.
- Toratti, T. (1992). "Creep of timber beams in a variable environment". Helsinki University of Technology, Report no. 31.
- Tucker, J. (1927). "A study of the compressive strength dispersion of material with applications". *Journal of the Franklin Institute*, Vol. 204, pp. 751-781.
- UNE-1995 (2010). UNE-EN 1995 -1-1: 2006/A1. Eurocódigo 5: Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación.
- UNE-56 (2011). UNE-EN 56.544: 2011. Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas.
- UNE-1912 (2012). UNE-EN 1.912: 2012. Madera estructural. Clases resistentes. Asignación de calidades visuales y especies.
- UNE-338 (2010). UNE-EN 338: 2010. Madera estructural. Clases resistentes.
- UNE-408 (2011). UNE-EN 408: 2011+A1. Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas.
- UNE-384 (2010). UNE-EN 384: 2010. Madera Estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad.
- Weibull, W. (1939). "A statistical theory of the strength of materials", Royal Swedish Institute for Engineering Research, Proceedings, vol. 141, pp. 45.



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.