

Análisis de la influencia de los defectos en el comportamiento a compresión de piezas de madera de pino silvestre utilizada en protecciones colectivas de obras.

De la Rosa García, P.

Dpto. Const. Arquitectónicas
y su Control, UPM
pilar.delarosa@upm.es

Cobo Escamilla, A.

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

González García, M.N.

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

RESUMEN

En el diseño de protecciones colectivas de obras de edificación se utilizan elementos de madera, como por ejemplo las barandillas de protección en sistemas provisionales de protección de borde. Una de las especies más utilizadas es el pino silvestre. Para el estudio del comportamiento de estos elementos ante los esfuerzos a los que van a estar sometidos es necesario conocer las características mecánicas del material. En este estudio se realiza un análisis del comportamiento piezas de madera de pino silvestre sometidas a compresión.

ABSTRACT

Different materials are used in the design of collective protection of building works. These include wood, railing systems used as temporary edge protection. One of the species used to fulfil this role within the collective protection is Scots pine, being the most suitable geometry in a table. To study the behaviour of these elements to the efforts that will be submitted in different situations must be based on the mechanical properties of the material itself is manufactured. In this communication we analyze the behaviour of pine wood subjected to compression.

Palabras clave - madera, protecciones colectivas, ensayo a compresión, defectos, clasificación visual.

Keywords – wood, collective protection, compression test.

1. Introducción

La madera es un material natural con una estructura interna formada por fibras longitudinales de celulosa y una matriz de lignina. La matriz envuelve las fibras, transmite los esfuerzos entre ellas, las mantiene unidas y las protege. Las fibras soportan las tracciones y la matriz las compresiones, lo que explica el diferente comportamiento del material a tracción y que a compresión (Connors et al, 1992). En este trabajo el estudio se centra en el comportamiento de la madera a compresión.

La anisotropía es una de las propiedades de la madera que determina su comportamiento. En este trabajo se analizará el comportamiento de las probetas sometidas a compresión en la dirección paralela a las fibras, siendo ésta la dirección fundamental de cara al análisis del comportamiento de las tablas a flexión.

El objeto de este trabajo es analizar la influencia de los defectos que presentan las piezas ensayadas en los valores mecánicos obtenidos experimentalmente en los ensayos.

2. Defectos de la madera aserrada para uso estructural

La presencia de defectos y las singularidades de la madera aserrada son factores que determinan las propiedades mecánicas de las piezas. Es inevitable que en elementos de gran escuadría aparezcan defectos de diferente naturaleza. La norma UNE-56544 establece criterios de clasificación visual, asignando clases resistentes según el tipo y la dimensión de los defectos que presentan las piezas. Dicha norma tiene como campo de aplicación las piezas longitudinales trabajando a flexión y colocadas de canto, además hace una distinción entre las piezas de canto mayor a 70mm y las de canto menor o igual a 70mm.

En el presente estudio se toma como guía para la consideración de defectos la citada norma UNE 56544, aunque las piezas ensayadas no se encuentren dentro del campo de aplicación de ésta. Entre los defectos que contempla la UNE- 56544, las piezas ensayadas presentan los siguientes: los nudos y las fendas de secado, de éstas últimas, hay estudios que ponen en entredicho la influencia que tienen sobre la resistencia de la piezas (Esteban et al.2010). También se han tenido en cuenta parámetros tales como: el ancho máximo de los anillos de crecimiento, la presencia de la médula y la desviación de la fibra, para analizar la relación de sus dimensiones y presencia respectivamente, con las características mecánicas obtenidas en los ensayos. Además de los factores anteriormente indicados, se midió la densidad de las piezas para estudiar la posible relación de ésta con las propiedades mecánicas.

3. Trabajo experimental

La madera empleada en los ensayos ha sido suministrada por el Aserradero de Valsain y procede de los montes con el mismo nombre. La calidad comercial de dicha madera es cuarta, admitiendo cualquier tipo o número de nudos y pudiendo aparecer azulado en las piezas. Se han ensayado seis probetas con unas dimensiones medias de 158x158 mm de sección recta y 300mm de altura. En general presentan nudos en algunas de sus caras, cuentan con fendas de espesores considerables y todas contienen la médula. La humedad media de la madera en el momento de medir los defectos y en el momento de ser ensayadas se encontraba muy próxima al 20% en las seis piezas.

3.1. Nudos

Los nudos que presentaban algunas de las piezas se han medido (figura 2) con dos criterios distintos. Una primera forma ha sido considerando la dimensión de los nudos en la cara más desfavorable, el segundo criterio fue sumando la dimensión de los nudos presentes en las cuatro caras y pertenecientes todos a una misma franja de 100mm según se observa en la figura 3. Las imágenes de la figura 3 corresponden a la probeta 5, en ella se pueden ver las cuatro caras de la pieza prismática. Los nudos están situados a la misma altura prácticamente, dentro de una franja transversal imaginaria menor a 100mm. Esto indica que la franja o conjunto de secciones contenidas en esa franja estarán especialmente debilitadas. Un ejemplo de los dos criterios de medición de nudos en el caso de la pieza 5 sería, para el primer criterio la suma de los diámetros de los dos nudos de la cara C, que es la más desfavorable de las cuatro en cuanto a nudos se



Figura 1. Medida del peso en báscula eléctrica de una de las piezas.



Figura 2. Detalle de medición de nudos.

refiere. Según el segundo criterio, el valor en milímetros sería la suma de los diámetros de todos los nudos contenidos en una misma franja de ancho menor a 100mm.

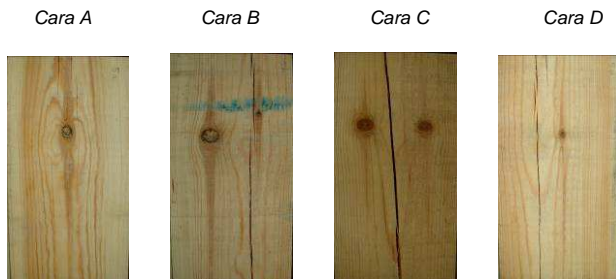


Figura 3. Detalle de las cuatro caras de la pieza 5.

En la figura 4 se indica la proyección de área nudosa teórica que correspondería a la sección más desfavorable de la pieza 5, teniendo en cuenta que la pieza contiene la médula y que está situada donde se ve en el esquema. La médula es el punto de partida o nacimiento de las ramas y por tanto de los nudos.

En la tabla 1 se indican los valores obtenidos de estas observaciones. Estos valores se considerarán en el apartado de análisis de los resultados para estudiar la relación entre los valores de los nudos obtenidos de las dos maneras y las tensiones y deformaciones obtenidas en los ensayos.

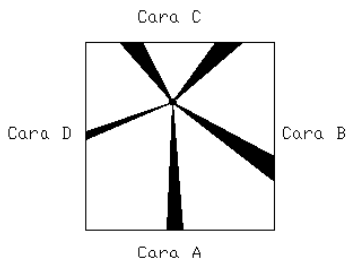


Figura 4. Proyección de área nudosa en la sección más desfavorable.

Probeta	1	2	3	4	5	6
Nudos I. (mm)	0,00	39,50	38,30	0,00	40,51	38,43
Nudos II. (mm)	0,00	57,73	51,84	0,00	79,61	106,03

Tabla 1. Valor de los nudos.

Nudos I. Indica el diámetro o suma de diámetro presentes en la cara más desfavorable.

Nudos II. Indica la suma de los diámetros de los nudos presentes en una misma franja de ≤ 10 mm.

3.2. Fendas y anchura máxima de anillos de crecimiento

Las fendas de secado se han medido siguiendo las pautas de la norma UNE 56544, sobre las testa de las piezas. Se ha considerado la testa más desfavorable de cada pieza y se ha medido la profundidad de las fendas, siempre que tuviesen un espesor mayor de 1mm. La humedad de las piezas no supera el 20%, siendo éste el valor límite que permite la norma para la clasificación visual considerando la madera seca.

La anchura máxima de los anillos de crecimiento se han medidos también siguiendo las indicaciones de la norma. Se ha calculado la media del ancho de los primeros cinco anillos

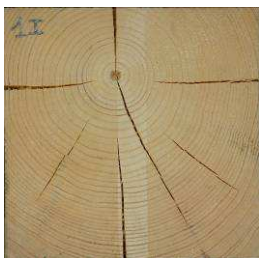


Figura 5. Testa más desfavorable de la pieza 1.

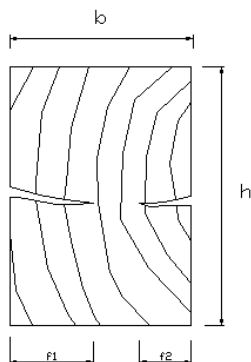


Figura 6. Criterio de medición de fendas según UNE 56544.

Evaluación de las fendas $(f1+f2)/b$

más próximos a la médula, en la testa más desfavorable en cuanto a anchura de anillo, es decir, tomando como valor la mayor de la medias hecha en cada testa. Esta característica de la madera está presente en la norma para la clasificación visual de la madera estructural, aunque no está clara su verdadera influencia en el valor de las características mecánicas (Fernández Golfín et al. 1994).

Probeta	1	2	3	4	5	6
Fendas	0,8306	0,6565	0,4625	0,3880	0,4186	0,4500
Anchura max. anillos de crecimiento (mm)	3,22	5,60	6,00	3,20	5,20	4,00

Tabla 2. Valor de fendas y anchura máxima de anillos de crecimiento.

En la Tabla 2 se indican los valores de las fendas y anchura máxima de anillos de las seis probetas.

3.3. Otros aspectos considerados

Otros aspectos observados son la presencia de la médula en todas las piezas, apreciándose en ambas testas de cada pieza. La inclinación de las fibras se ha considerado despreciable, ya que en ningún caso se supera el valor límite que indica la norma del 16,70%.

Probeta	1	2	3	4	5	6
Densidad (kg/m ³)	483,71	506,08	582,13	587,38	565,37	601,19
Médula	Todas contienen la médula					
Inclinación de las fibras	<16,70%					

Tabla 3. Características de las probetas para su clasificación visual.

La densidad se ha medido, como ya se ha indicado anteriormente, con una humedad media de las piezas muy próxima al 20%. En la Tabla 3 se recogen los datos de cada una de las piezas.

Los ensayos a compresión se realizaron en el Laboratorio de Materiales de Construcción de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. Se ha empleado una prensa con capacidad de carga suficiente para alcanzar la rotura de las piezas, con control por carrera. Durante la aplicación de las cargas, se han medido continuamente los desplazamientos por medio de un extensómetro con carrera nominal de 20mm. Para las tres primeras probetas se midió el desplazamiento hasta el valor límite dado por el extensómetro, en las tres últimas se recolocó el extensómetro una vez que llegó al límite y se midió el desplazamiento hasta la rotura. En la figura 7 se puede apreciar el ensayo a compresión de una de las probetas.



Figura 7. Detalle del ensayo a compresión de una de las piezas

4. Resultados obtenidos

En las figuras 8 y 9 se muestran los diagramas tensión deformación de las seis probetas ensayadas. Los valores se han calculado a partir de los datos de fuerza y desplazamiento suministrados por el software asociado a la prensa de ensayos.

Como se ha indicado en el apartado anterior, el ensayo de las probetas 1, 2 y 3 se detuvo cuando el extensómetro marcó su máximo recorrido, igual a 20 mm. Por ello, se observa en las gráficas un corte en el diagrama cuando el valor de la deformación longitudinal unitaria corresponde a dicho acortamiento de las piezas. La deformación correspondiente alcanza valores entre 60 y 70 por mil.

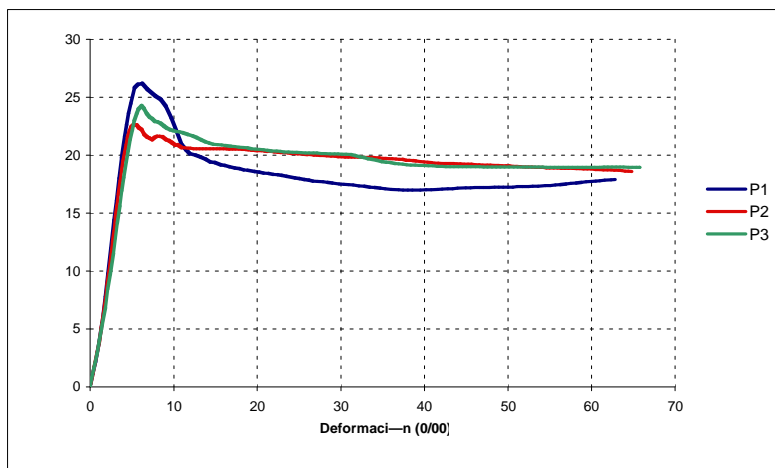


Figura 8. Diagrama tensión-deformación de las probetas 1, 2 y 3.

En el caso de las probetas 4, 5 y 6 se volvió a colocar el extensómetro, tomándose datos del desplazamiento hasta el momento de la rotura.

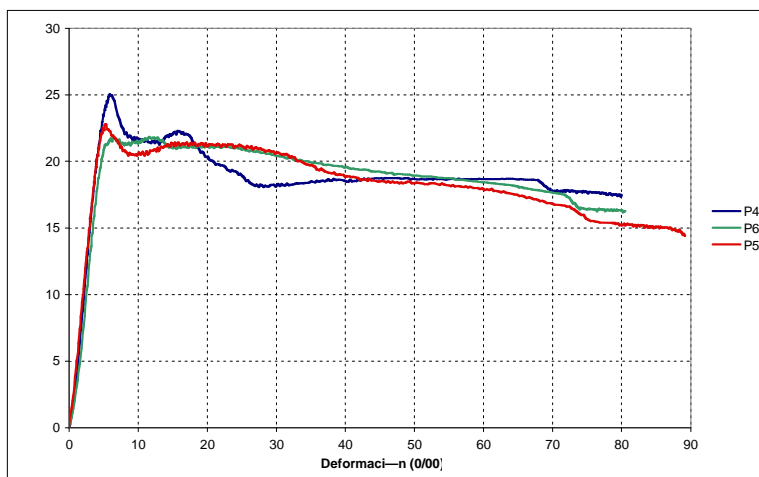


Figura 9. Diagrama tensión-deformación de las probetas 4, 5 y 6.

Las deformaciones longitudinales unitarias últimas de estas tres probetas adquieren valores comprendidos entre 70 y 90 por mil.

En la tabla 4 se incluyen los resultados de las probetas ensayadas: tensión máxima con la correspondiente deformación longitudinal unitaria, módulo de elasticidad longitudinal, deformación última en el caso de las probetas 4, 5 y 6, y tensión a la que se producen dichas deformaciones. En las dos últimas columnas se indica el área elástica y el área total hasta el momento de la rotura.

Probeta	σ_{\max} (N/mm ²)	ϵ_1 (‰)	σ_2 (N/mm ²)	ϵ_{\max} (‰)	E (N/mm ²)	A_e (N/mm ²)	A_t (N/mm ²)
1	26,18	6,219	-	-	4.675,28	97,57	-
2	22,62	5,299	-	-	4.450,16	67,11	-
3	24,25	6,133	-	-	4.160,70	83,18	-
4	24,96	6,107	17,45	79,989	4.503,47	87,38	1.499,35
5	22,78	5,277	14,40	89,129	4.845,41	68,63	1.624,17
6	21,71	6,013	16,27	80,520	4.140,70	73,44	1.514,66

Tabla 4. Valores experimentales de las probetas ensayadas.

σ_{\max}	tensión máxima en N/mm ² .
ϵ_1	deformación longitudinal unitaria que corresponde a la tensión máxima en ‰.
σ_2	tensión que corresponde a la máxima deformación longitudinal unitaria en N/mm ² .
ϵ_{\max}	deformación longitudinal unitaria máxima en ‰.
E	módulo de elasticidad longitudinal
A_e	densidad de energía elástica en N/mm ² .
A_t	densidad de energía total en N/mm ² .

5. Análisis de los resultados

El análisis de los resultados de las figuras 8 y 9 y de la tabla 4 permite indicar que el comportamiento mecánico de las seis piezas es muy similar, tanto por la forma de los diagramas como por los valores alcanzados en los ensayos. A continuación haremos un análisis estadístico que nos permitirá conocer la correlación entre las distintas variables. Un grupo de variables será el formado por aquellas que definen las singularidades (incluidos los defectos) y las características físicas de la madera: densidad, anchura de anillos de crecimientos, nudos y fendas. El otro grupo de variables, del que se va a estudiar la correlación con el anterior, será el formado por los valores de resistencia, módulo de elasticidad y deformación longitudinal unitaria, calculados a partir de los datos obtenidos en los ensayos de cargas y desplazamientos.

Para realizar el análisis estadístico, se han calculado las medias aritméticas, las desviaciones típicas y los coeficientes de correlación de las variables estudiadas.

A continuación se presenta el estudio por separado de las variables.

5.1. Densidad

En la tabla 5 se reflejan los coeficientes de correlación entre la densidad y la tensión máxima, la deformación longitudinal unitaria y el módulo de elasticidad. Para hallar este dato se han calculado previamente las medias y las desviación típicas de las variables que

	Densidad	$\sigma_{\text{máx}}$	Densidad	ϵ	Densidad	E
Media	554,30	23,75	554,30	5,84	554,30	4.462,62
Desviación típica	43,76	1,53	43,76	0,40	43,76	254,42
Coefficiente de Correlación	-0,42		0,17		-0,48	

Tabla 5. Valores estadísticos para el análisis de la influencia de la densidad en la $\sigma_{\text{máx}}$, ϵ y E.

intervienen. En esta tabla se observa que la densidad tiene un coeficiente de correlación bajo con los valores estudiados de tensión de rotura, deformación longitudinal unitaria y módulo de elasticidad. En la caso de la doformación, la relación entre ambas variables es muy baja. Algo más alta es la relación con la tensión de rotura y el módulo de elasticidad, pero como se puede observar, se trata de una correlación negativa, es decir, a mayor densidad menor tensión de rotura y de la misma manera, a mayor densidad, menor módulo de elasticidad. Esta circunstancia, puede ser debida a la coincidencia (tabla 1 y 3) de que en las probetas de mayor densidad existe mayor número de nudos y viceversa. Independientemente del signo, la correlación entre estas variable es baja.

5.2. Ancho de anillos de crecimiento

En la tabla 6 se observan los coeficientes de correlación entre la anchura de los anillos de crecimiento y las variables mecánicas, de la misma manera que en la tabla anterior. En este caso se observa también una baja correlación entre las variables. Para la deformación longitudinal unitaria se puede considerar que existe una correlación moderada de signo negativo.

	Ancho Anillos	$\sigma_{\text{máx}}$	Ancho Anillos	ϵ	Ancho Anillo	E
Media	5,54	23,75	5,54	5,84	5,54	4.462,62
Desviación típica	1,12	1,53	1,12	0,40	1,12	254,42
Coefficiente de Correlación	-0,47		-0,55		-0,21	

Tabla 6. Valores estadísticos para el análisis de la influencia de la anchura de anillos en la $\sigma_{\text{máx}}$, ϵ y E.

5.3. Fendas de secado

En cuanto a la relación existente entre las fendas de secado que presentan las piezas, y las variables mecánicas analizadas, observamos en la tabla 7 que existe también un baja correlación. Además, el coeficiente de correlación es positivo, lo cual, parece que existen otras variables que están influyendo en este valor, ya que en principio, no parece lógico, que a mayor valor de la fendas de secado, mayor sea la resistencia de las piezas y el módulo de elasticidad.

	Fendas	$\sigma_{\text{máx}}$	Fendas	ϵ	Fendas	E
Media	0,54	23,75	0,54	5,84	0,54	4.462,62
Desviación típica	0,16	1,53	0,16	0,40	0,16	254,42
Coeficiente de Correlación	0,45		0,09		0,45	

Tabla 7. Valores estadísticos para el análisis de la influencia de las fendas de secado en la $\sigma_{\text{máx}}$, ϵ y E.

5.4. Nudos

Para el estudio de la influencia de los nudos en las distintas propiedades mecánica, se han realizado dos formas distintas de medir las dimensiones de éstos, como ya se dijo con anterioridad. Tal y como se observa en la tabla, la medición de nudos I (tabla 8) corresponde al valor de la suma de los nudos presentes en la cara más desfavorable de cada pieza. La medición de nudos II (tabla 9), se realiza sobre las cuatro caras, sumando los

	Nudos I	$\sigma_{\text{máx}}$	Nudos I	ϵ	Nudos I	E
Media	26,12	23,75	26,12	5,84	26,12	4.462,62
Desviación típica	18,49	1,53	18,49	0,40	18,49	254,42
Coeficiente de Correlación	-0,85		-0,61		-0,32	

Tabla 8. Valores estadísticos para el análisis de la influencia de los nudos de secado en la $\sigma_{\text{máx}}$, ϵ y E. Nudos I. Indica el diámetro o suma de diámetro presentes en la cara más desfavorable.

diámetros de los nudos que se encuentran dentro de una misma franja de 10cm. En la tabla 8 se observa, que existe un alto coeficiente de corelación entre el valor de los nudos y la tensión máxima alcanzada, con valor negativo, es decir, a mayor número y dimensión de nudos medidos en la cara más desfavorable, menor es la tensión máxima alcanzada. También se observa una correlación positiva moderada entre el valor de los nudos y la deformación longitudinal unitaria. El valor del coeficiente de correlación nos indica que al aumentar el valor de los nudos disminuye la deformación longitudinal unitaria, esto puede ser debido a que, al ser menor el valor de la tensión máxima con mayor presencia de nudos,

y al tener una correlación ésta con el módulo de elasticidad baja, la deformación longitudinal unitaria correspondiente a la tensión máxima también es menor.

En la tabla 9 se ha analizado la influencia de los nudos medidos en las cuatro caras y en la franja menor o igual a 10cm más desfavorable. La correlación entre los valores de los

	Nudos II	$\sigma_{\text{máx}}$	Nudos II	ϵ	Nudos II	E
Media	49,20	23,75	49,20	5,84	49,20	4.462,62
Desviación típica	38,89	1,53	38,89	0,40	38,89	254,42
Coefficiente de Correlación	-0,93		-0,47		-0,34	

Tabla 9. Valores estadísticos para el análisis de la influencia de los nudos de secado en la $\sigma_{\text{máx}}$, ϵ y E Nudos II. Indica la suma de los diámetros de los nudos presentes en una misma franja de $\leq 10\text{mm}$.

nudos y la tensión máxima de las piezas es muy alta. Existe gran relación entre la tensión máxima alcanzada por las piezas y el número y dimensiones de los nudos. Esta correlación es mayor midiendo los nudos en la franja más desfavorable (II) que en la cara más desfavorable (I). La relación con la deformación longitudinal unitaria y el módulo de elasticidad en este caso es bajo.

6. Conclusiones

Para la clasificación visual de madera aserrada, sometida a compresión, en el sentido paralelo a las fibras, existe mayor grado de correlación entre la tensión máxima y el valor de los nudos I (medido en todo el perímetro de la pieza y en la franja más desfavorable), que entre ésta y el valor de los nudos II (medidos como sumatorio de los nudos en la cara más desfavorable).

De las propiedades y defectos analizados: densidad, anchura de anillos de crecimiento, fendas y nudos, la presencia de nudos es, de manera significativa, la variable que mayor correlación tiene con la tensión máxima alcanzada por las piezas.

Ninguno de los variables estudiadas presenta una correlación clara con la deformación longitudinal unitaria, ni con el módulo de elasticidad.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al Departamento de Tecnología de la Edificación de la EUATM-UPM la financiación recibida para la adquisición de las probetas. También desean agradecer la disponibilidad del Laboratorio de Materiales de Construcción del Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la ETSAM-UPM para la realización de los ensayos.

Referencias Bibliográficas

- Ramos, B. A. (1991). "Uso de la clasificación estructural mecánica y visual para predecir la zona de ruptura de la madera sometida a compresión". Ciencia e Investigación Forestal. Vol. 5, núm.1.
- Connors, T. E.; Medvecz, P. J. (1992). "Wood as a bimodal material". *Wood Science and Technology*, 24, 413-423.

- CTE (2006). *Documento básico de seguridad estructural: Madera*. Ministerio de Fomento. España.
- Esteban, M. et al. (2010). "Influencia de las fendas en la resistencia de la madera estructural". *Materiales de Construcción*. Vol. 60, 299, 115-132.
- Eurocódigo 5 (1995). *Proyecto de estructuras de madera*. AENOR, Madrid.
- González, M.N. (2010). "Consideraciones respecto de los sistemas provisionales de protección de borde". Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
- UNE 56544 (2007). *Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas*. AENOR, Madrid.
- UNE-EN 338 (2010). *Madera estructural. Clases resistentes*. AENOR, Madrid.