

## DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD RESISTENTE DE MADERA ESTRUCTURAL DE *PINUS SYLVESTRIS* MEDIANTE PLG

*Casado M\*, Acuña L., Vecilla D., Basterra A., Pando V. Relea E.*

Laboratorio de Maderas de la Universidad de Valladolid

\*Autora para la correspondencia: milac@iaf.uva.es

\*Avda. de Madrid 44 (Yutera), 34071 – Palencia, España

### RESUMEN

El PLG (Portable Lumbre Grader) fue desarrollado por el laboratorio de NDT en madera de la Universidad del Este de Hungría. Es un método de vibraciones inducidas basado en principios similares a la técnica de ultrasonidos, relaciona la velocidad de propagación de una onda (provocada por un impacto) con el módulo de elasticidad. El equipo registra la frecuencia de resonancia de una onda provocada por el impacto de un martillo en la madera, determina el Módulo de Elasticidad Dinámico y asigna una clasificación estructural según la norma EN 338.

En este trabajo se presentan los resultados de los ensayos realizados con PLG contrastados con los ensayos de flexión según la norma EN 408 realizados sobre 57 piezas de *Pinus sylvestris* de madera estructural de sección transversal de 75 x 155 mm y 80 x 200 mm. Los resultados indican que existe una buena correlación entre el Módulo de Elasticidad determinado en los ensayos de flexión y el Módulo de Elasticidad Dinámico obtenido con el PLG. Se extrae como conclusión que es posible clasificar *Pinus sylvestris* mediante este método si bien será necesario ampliar el estudio con un lote mayor de piezas.

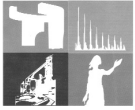
**Palabras clave:** Madera, ensayo no destructivo, vibraciones inducidas, clasificación resistente.

### ANTECEDENTES

En Europa está ampliamente aceptado que la madera estructural debe ser clasificada antes de su puesta en servicio. Por ello se han establecido un gran número de normas y se han desarrollado numerosos métodos de ensayo para la asignación de clases resistentes en las distintas especies.

La técnica de ondas de impacto para valorar la calidad de la madera está basada en la medida de la velocidad de propagación de la onda de vibración generada por un impacto. Esta técnica fue desarrollada en la Universidad de Washington entre otras cosas para determinar el módulo de elasticidad dinámico en piezas pequeñas sin defectos (1).

El laboratorio de ensayos no destructivos en madera de la Universidad del Este de Hungría en Sopron estimó el Módulo de Elasticidad dinámico a partir del PLG (2).



Arriaga (3) en piezas de *Pinus radiata* de tamaño estructural obtuvo una buena relación entre el Módulo de Elasticidad dinámico obtenido con el PLG y el Módulo de Elasticidad determinado en el ensayo de flexión ( $R_2 = 0,77$ ), el valor de corrección del módulo del PLG teniendo en cuenta los nudos no mejoró esa relación. Según los mismos autores (3) el equipo determina las clases resistentes con un carácter conservador de manera que indica la necesidad de ajustar los parámetros de clasificación para disminuir el porcentaje de rechazo y optimizar el material.

## MATERIAL Y MÉTODOS

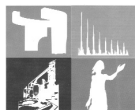
El material objeto de estudio son 57 tablones de *Pinus sylvestris* de sección media de 75 x 155 mm y 80 x 200mm y una longitud entre 2.800 y 3.600 mm (figura 1).



Figura 1. Lote de madera de *Pinus sylvestris*

## DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD CON XILOHIGRÓMETRO

La humedad en la madera se determinó primeramente con un xilohigrómetro de resistencia según la norma EN 13183-2 (2002) “Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 2: Determinación por el método de resistencia eléctrica”(4). Con este dato se corrigió el contenido de humedad para el programa del PLG.



## ENSAYOS CON EL PLG

Los ensayos con el PLG de Fakopp se realizaron colocando un soporte en un extremo de la pieza y en el otro extremo una célula de carga de forma que ésta soportaba la mitad del peso de viga a ensayar como se observa en las figuras 2, 3 y 4. Se tomaron dos medidas repetidas golpeando con el martillo en la testa de la pieza apoyada en el soporte; en el otro extremo un micrófono recoge la señal que tras pasar por un amplificador es procesada por el programa del PLG indicando la frecuencia, velocidad, módulo de elasticidad dinámico y clasificación resistente según norma EN 338:1999 “Estructuras de maderas. Clases resistentes”(5).

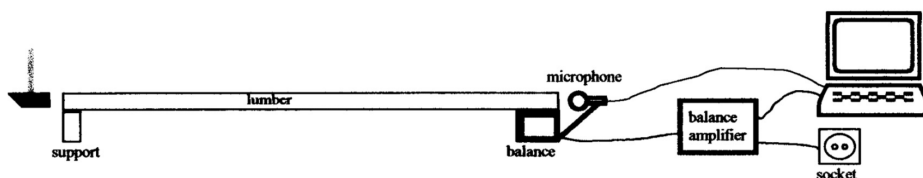


Figura 2. Esquema del ensayo con el PLG. (Fuente FAKOPP)



Figura 3. Ensayo con el PLG

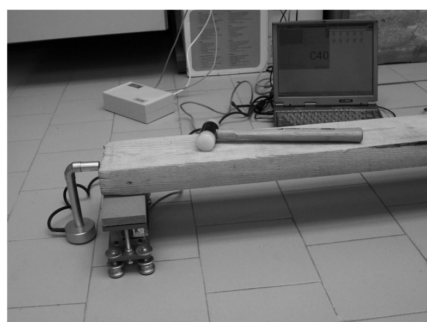


Figura 4. Detalle de la colocación del micrófono y balanza

El software del PLG determina el Módulo de Elasticidad Dinámico mediante la siguiente ecuación:

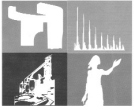
$$E_{\text{dyn}} = 0,92 \cdot \rho \cdot (2 \cdot L \cdot f_l)^2 \cdot (1 + \Delta H/50)$$

Donde:  $\rho$  es la densidad,  $L$  es la longitud,  $f_l$  es la frecuencia en la vibración longitudinal y  $\Delta H$  es la diferencia del contenido de humedad respecto del 12%.

Este módulo de elasticidad es modificado según la calidad de la madera, obteniéndose el Módulo de Elasticidad Dinámico corregido:

$$E_{\text{dyn,c}} = E_{\text{dyn}} - 6,2 \cdot \text{CKDR}$$

Donde CKDR es Concentrated Knot Diameter Radio (Índice concentrado de diámetro de nudos). Sin embargo, este factor de corrección no se utilizó en el presente estudio, dada su excesiva influencia en la clasificación de las vigas penalizando en exceso su calidad. Esta decisión se tomó en base a estudios anteriores (3), que demostraban que la inclusión del CKDR no mejoraba



las predicciones en la clasificación de la madera y porque además en el lote analizado las piezas apenas tienen nudos.

El software del PLG permite seleccionar las siguientes variables que influyen en la onda de vibración y que se trata tanto de los factores ambientales como de las características propias de la madera (figura 5). Estos factores son:

- **Especie.** Debido a que la estructura interna de cada tipo de madera influye en la velocidad de propagación de la onda. El equipo permite distinguir solamente entre coníferas y frondosas.
- **Humedad.** El PLG está calibrado para un contenido de humedad en la madera de un 12%. Se debe indicar la diferencia de humedad en la pieza a estudiar con respecto a este valor.
- **Dimensiones.** De cada muestra, se introduce la longitud, el ancho y el espesor expresados en cm. Con tales datos el programa del equipo calcula la densidad.
- **Índice concentrado del diámetro de los nudos (CKDR).**

El índice del diámetro del nudo (KDR) es el porcentaje del diámetro del nudo respecto al ancho de la superficie en la que se encuentre. Y el índice concentrado del diámetro de los nudos (CKDR) es la suma de los KDR de los nudos existentes en 15 cm cualquiera de la longitud de la pieza. El mayor CKDR, teniendo en cuenta las cuatro caras, es el índice representante de la pieza. Como se ha indicado antes no fue un factor que se analizara en este estudio.

- **Nivel de eco.**

El nivel de eco del lugar donde se efectúa el ensayo debe ser tenido en cuenta, ya que provoca alteraciones en la medida de la frecuencia de la onda. El software del PLG diferencia entre el ruido de fondo y la señal de graduación. El nivel de ruido establece correctamente

Figura 5. Introducción de datos y selección de opciones en PLG.

que la evaluación automática comience sólo si la vibración longitudinal es generada por el impacto de un martillo en la pieza.

• **Balanza.**

En esta opción es posible determinar si se selecciona la mitad del peso de la pieza o el peso total de la misma. Ello depende de la longitud de las muestras y la colocación de la balanza en un extremo de la pieza registrando la mitad del peso o en la mitad de la pieza en cuyo caso la balanza registra el peso total de la pieza (figura 6).

Introducidas todas las variables y después de impactar con un martillo en la pieza, aparece la pantalla de la clasificación donde se detalla la información obtenida en el ensayo: frecuencia, velocidad, espectro de la onda, el módulo de elasticidad, densidad, dimensiones introducidas y clasificación resistente de la madera (figura 7).

Para asignar la clase resistente según la norma EN-338 (5), se utiliza el Módulo de elasticidad

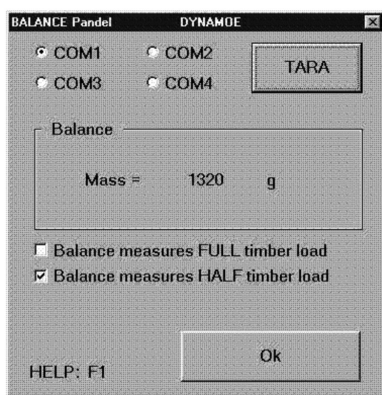


Figura 6. Panel de ajuste de balanza

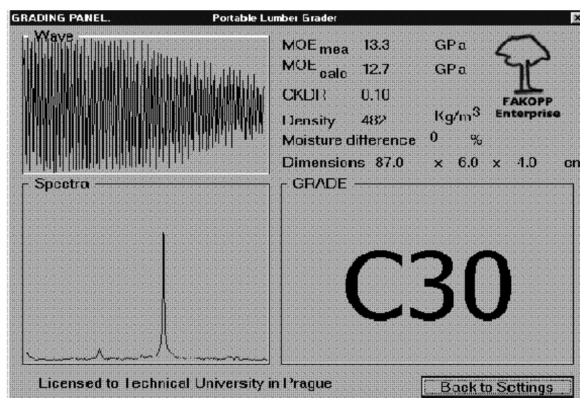


Figura 7. Pantalla final de resultados.

obtenido y la densidad de acuerdo con lo mostrado en la tabla 1, donde se han destacado los valores correspondientes a las dos calidades de la madera de *Pinus sylvestris* según la norma UNE 56.544:2003.

**Tabla 1. Clases resistentes para coníferas a partir de valores del Módulo de elasticidad y la densidad**

Clasificación	C14	C16	C18	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
MOE (N/mm <sup>2</sup> )	7	8	9	10	11	11,5	12	13	14	15	16
$\rho$ media (kg/m <sup>3</sup> )	350	370	380	410	420	450	460	480	500	520	550

**Ensayos de flexión en máquina universal**

Los ensayos de flexión se ejecutaron según la norma UNE-EN 408:2004 (6), con una máquina universal de ensayos de 100 KN de carga máxima. Para la determinación del módulo de elasti-

cidad global de canto a flexión (MOEGTO) se colocó el palpador en el canto de la pieza a ensayar (figura 8).

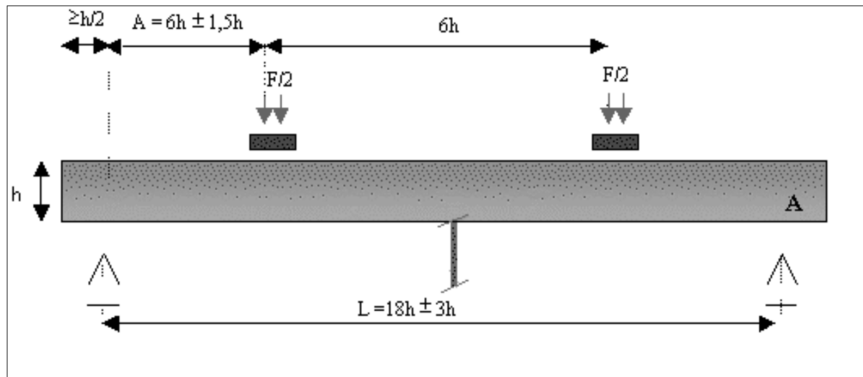


Figura 8. Ensayo determinación del MOEGTO a flexión. UNE-EN 408:2004

Las variables de funcionamiento de la máquina para el ensayo se seleccionaron dependiendo del canto de la pieza a ensayar con la velocidad adecuada para que el ensayo se realice según la norma indicada anteriormente. Una vez anotada la carga y la deformación del canto se retiró el palpador y se calculó el MOE, se descargó y se realizó el ensayo de rotura anotándose entonces el “módulo de rotura” o la resistencia a la rotura MOR. El número de piezas ensayadas a flexión fue de 47 ya que 10 no cumplían con la longitud  $18h \pm 3h$  exigida por la citada norma.

Los resultados de los ensayos de flexión fueron corregidos para expresarlos a una humedad referida del 12% según la norma EN-UNE 384 (7).

El Módulo de Elasticidad Local a Flexión (MOE) se ha calculado según la siguiente ecuación:

$$MOE_{12} = 1,3 \times MOEGTO_{12} - 2.690$$

## DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD Y HUMEDAD

Después de realizar todos los ensayos anteriores a cada pieza, se procedió a extraer una probeta de 10 cm de anchura, próxima a la zona de rotura y libre de defectos, de cada una de las vigas como indica la figura 9.

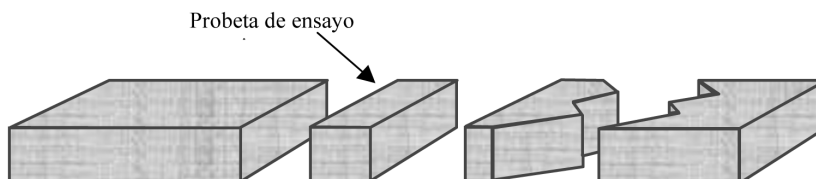
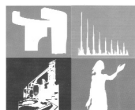


Figura 9. Ilustración de la obtención de la probeta.





La densidad se determinó según lo dispuesto en la norma UNE-EN 408:2004 “Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas” (8).

La humedad se midió con las mismas probetas que se emplearon para el cálculo de la densidad y según lo dispuesto en la norma EN13183-1/AC:2004 “Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 1: Determinación por el método de secado en estufa” (9).

Los valores de la densidad fueron corregidos para referirlos a una humedad del 12%.

## TRATAMIENTO ESTADÍSTICO DE LOS DATOS

El análisis estadístico se realizó utilizando el programa STATGRAPHICS Plus 5.1. En los diferentes análisis estadísticos se verificaron las hipótesis de normalidad de las variables y la independencia de los residuos.

En los análisis descriptivos de las variables analizadas se indican; media aritmética, desviación típica y el coeficiente de variación.

En los análisis de la varianza se comprobaron las hipótesis de independencia, normalidad y homocedasticidad de varianza de los errores experimentales. Las pruebas de rango múltiple utilizadas fueron la de Tukey (diferencia significativa honesta) y la LSD de Fisher para modelos no balanceados, habiendo obtenido por ambos métodos resultados muy similares.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla 2 se indica la estadística descriptiva con las características del lote de *Pinus sylvestris* con los resultados de las variables de los distintos ensayos realizados.

Los resultados de los ensayos de flexión nos indicarían que el lote corresponde a una clasificación resistente C40 según norma EN 338 (5), muy superior a la clasificación de UNE 56544 (10) que a la calidad estructura ME-1 asigna una clase C27. Según el criterio de clasificación del PLG la población sería de clase C30.

La asignación de calidad en la madera según el Módulo de Elasticidad Dinámico dado por el PLG como el Módulo de Elasticidad Local del ensayo de flexión, para las calidades ME-1 y ME-2 son muy similares como se aprecia en la figura 10.

La clasificación en clases resistentes según la norma EN 338 (5) mediante el Módulo de Elasticidad Dinámico dado por el PLG y el Módulo de Elasticidad Local del ensayo de flexión, ofrece la distribución de frecuencias de la figura 10. Como se observa en el gráfico, el PLG da mayor número de piezas en las calidades medias (C22 a C35) que los resultados de máquina y, por el contrario, es conservador en las calidades altas clasificando un menor número de piezas en las clases resistentes iguales o superiores a la C40 (figura 11).

Por otra parte conviene señalar que el software del PLG asigna como clase resistente máxima la C40, por lo que en lotes de buena calidad se debe apuntar el Módulo de Elasticidad Dinámico y obviar la asignación de clase que ofrece la pantalla final del programa.

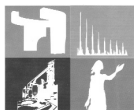


Tabla 2. Estadística descriptiva de los resultados de los ensayos con el PLG y de flexión según norma EN408:2004

	Variables	Nº datos	Media	Desviación típica	Coef. varia. (%)
<b>Variables del PLG</b>	Frecuencia (Hz)	57	797,9	108,1	13,6
	Velocidad (m/s)	57	4.779,65	292,6	6,1
	MOE <sub>PLG</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	57	12.507	1.915	15,3
<b>Variables del Ensayo de flexión EN 408</b>	MOEGTO (N/mm <sup>2</sup> )	47	13.114,4	2.398,9	18,3
	MOE (N/mm <sup>2</sup> )	47	14.358,7	3.118,54	21,7
	MORC (N/mm <sup>2</sup> ) (valor característico)*	47	66,3 (43,4)*	13,27	20,0
<b>Densidad norma EN 408</b>	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> ) (valor característico)*	47	573,9 (485,6)*	63,38	11,0
<b>Humedad norma EN 13183</b>	Humedad (%)	47	10,3	0,48	4,6

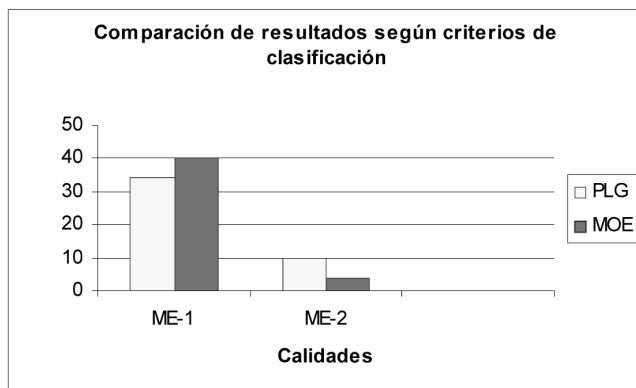


Figura 10. Histogramas de clasificación del PLG y MOE según las calidades de la norma UNE 56.544.

Para el estudio de la predicción de las propiedades mecánicas a partir de los resultados de los ensayos no destructivos con el PLG se han tenido en cuenta únicamente las variables que se relacionaban significativamente con el MOR y con el MOE.



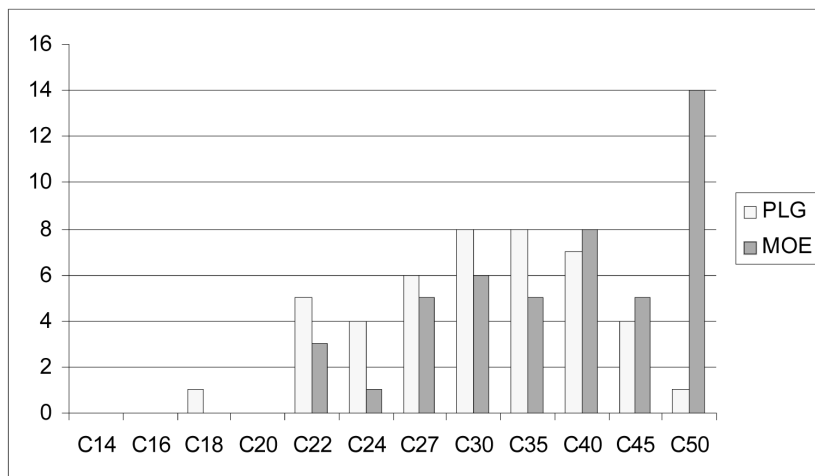
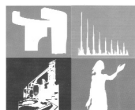


Figura 11. Histogramas de clasificación del PLG y MOE según las calidades de la norma EN338

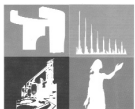
Se puede estimar el MOE a partir de las variables que mide el PLG pues tiene una buena correlación con la medida de la densidad de la viga que indica el PLG y la velocidad de la onda de impacto. Aún así el R- cuadrado ajustado que se obtiene  $R^2 = 65,3$  es inferior que al conseguido por autores en trabajos anteriores (3). Se ha obtenido una relación estadísticamente significativa entre el Módulo de Rotura (MOR) y la frecuencia y densidad indicadas en el programa del PLG con un  $R^2 = 44,2$ . En la tabla 3 se indican las ecuaciones del modelo y otros resultados estadísticos.

Tabla 3. Resumen de las regresiones realizadas

Variable Dependiente	Parámetros	P- Valor	R <sup>2</sup>	Ecuación del modelo
MOE	MOE <sub>d</sub> PLG	0,000	65,3	$MOE = 1.152,9 + 1,04 * MOE_d$
MOE	Velocidad Densidad <sub>PLG</sub>	0,000	62,9	$MOE = -25.665,6 + 23,1 * Den + 5,58 * Vel$
MOR	Frecuencia Densidad <sub>PLG</sub>	0,000	44,2	$MOR = - 40,53 + 0,08 * Fre + 0,07 * Den$

## CONCLUSIONES

La técnica de transmisiones acústicas a través del uso de PLG como predictora del Módulo de Elasticidad Local (MOE), es un método que ofrece unos resultados bastante aceptables y permite



una clasificación estructural de las piezas muy similar a los resultados de los ensayos de flexión, si bien la asignación de clases resistentes según el software del PLG es conservadora y subestima la calidad de las piezas en las clases resistentes más altas.

A partir de los ensayos realizados con PLG, se pueden sacar las siguientes conclusiones del uso de este equipo:

- La clasificación estructural inmediata mostrada en la pantalla realizada por el aparato a partir del valor del MOE determinado, no es del todo fiable debido a que no hace distinción entre especies; tan sólo diferencia coníferas de frondosas y no asigna clases resistentes superiores a C40.
- No es necesario repetir el ensayo varias veces para cada muestra, puesto que la variabilidad entre los valores obtenidos es muy baja. Sólo será necesario en aquellos casos donde se dude de su validez; sospechando de la existencia de errores por una mala ejecución del impacto con el martillo o fallo en la recepción de la resonancia por parte del micrófono receptor.
- Sólo es válido en piezas que permitan su colocación sobre la balanza. Así pues, no podría utilizarse en vigas o viguetas con uno o los dos de sus extremos colocados en obra.

Los miembros del grupo de trabajo estamos trabajando con este equipo en otras especies para conocer en mayor profundidad las posibilidades de este método de ensayo no destructivo.

## REFERENCIAS

- (1) V. Bucur. "Acoustics of wood". CRC Press.1995
- (2) F. Divos. "Portable Lumbre Grader". *13<sup>th</sup> International Symposium on Non destructive Testing of Wood*. Berkeley, California, USA. 2002. [conferencia ]
- (3) F. Arriaga, G. Iñiguez, M.Esteban. "Assesment of strength and stiffness properties using longitudinal stress wave on structural gross cross section timber of radiata pin (Pinus radiata D.Don)". *Symposium NDT 2005*. [conferencia ]
- (4) EN 13183-2 (2002) "Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 2: Determinación por el método de resistencia eléctrica".
- (5) EN 338:1999 "Estructuras de maderas. Clases resistentes".
- (6) UNE-EN 408:2004 "Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas".
- (7) EN-UNE 384: 2004. "Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y de la densidad".
- (8) UNE-EN 408:2004. "Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas".
- (9) EN13183-1/AC:2004. "Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 1: Determinación por el método de secado en estufa".
- (10) UNE 56544:2003. "Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas".