

Caracterización de la madera de *Castanea sativa* Mill. de procedencia española

A. Vega Cueto

Estudiante PhD CETEMAS
Asturias, Spain
avega@cetemas.es



V. Baño Gómez

Dra., Investigadora CETEMAS
Asturias, Spain
vbanho@cetemas.es



J. Majada Guijo

Dr., Director Científico CETEMAS
Asturias, Spain
jmajada@cetemas.es



I. Fernández Parrado

Tecnico CETMAS
Asturias, Spain
iparrado@cetemas.es



M. Guaita Fernández

Dr., Catedrático Universidade USC
Dpto. Enxeñaría Agroforestal
m.guaita@usc.es



Palabras clave - *Castanea sativa*, madera estructural, caracterización mecánica, clases resistentes

Keywords - *Castanea sativa*, structural timber, mechanical characterization, strength classes

RESUMEN

La madera de castaño de procedencia española no está presente como material estructural en la norma europea EN 1912, y por lo tanto no está asignada a ninguna clase resistente como sí lo están otras especies españolas. Por ello, en el presente trabajo se realizó una caracterización de madera aserrada de castaño de Asturias con fines estructurales, realizando los ensayos según la norma UNE EN 408:2004, y calculando sus valores característicos según la norma UNE EN 384:2010. Los valores obtenidos permitieron asignar una clase resistente de las establecidas en la norma UNE EN 338:2010. Fueron evaluadas un total de 260 probetas de dos secciones (40x100 y 40x150 mm) siendo asignada una clase resistente D24, resultando la densidad y la resistencia a flexión los parámetros limitantes y observándose un valor de módulo de elasticidad superior al correspondiente a dicha clase. La relación entre los módulos de elasticidad longitudinal y transversal obtenidos experimentalmente fue de 10 aproximadamente, mientras que la normativa establece, como valor genérico, 16. Se observó que la singularidad de la madera que provocó un mayor porcentaje de rotura fue la presencia de nudos, presentando estas probetas un valor de resistencia significativamente menor.

ABSTRACT

Chestnut timber from Spain is not included as a structural timber in the European standard EN 1912 nor is it assigned to any strength class like other Spanish species. Therefore, a characterization of structural chestnut timber from Asturias was made according to the UNE EN 408:2004, and the characteristic values were calculated according to the UNE EN 384:2010. The values obtained allowed the assignment of a strength class according to UNE EN 338:2010. 260 samples of two sections (40x100 and 40x150 mm) were tested and a D24 strength class was assigned. Density and bending strength were the limiting parameters, and the value of modulus of elasticity was higher than the values assigned to D24. The relationship between modulus of elasticity and the shear modulus obtained was approximately equal to 10, while this value in the UNE EN 384:2010 is set at 16. The characteristic of the wood which caused a higher percentage of failure was the presence of knots, resulting in significantly lower resistance values.

1. Introducción

El castaño (*Castanea sativa* Mill.) es una especie de gran importancia en el ámbito de la construcción, tradicionalmente empleada y cuya valía estructural está plenamente probada. A pesar de esto, esta madera no está caracterizada como material estructural en España, no estando asignada a ninguna clase resistente como sí lo están otras especies de nuestro país, como el eucalipto y las cuatro principales especies de pino, reflejadas en la norma EN 1912.

El empleo de una madera como material estructural requiere no sólo el conocimiento de sus propiedades, sino su adecuación a la normativa vigente. De este modo, la norma UNE EN 338 establece clases resistentes en función de criterios elásticos, resistentes y de densidad, asignando unos valores de cálculo, diferenciando la madera de coníferas y la de frondosas. Para la determinación de estos parámetros es necesaria la realización del ensayo según la norma UNE EN 408, de la cual son obtenidos los valores del módulo de elasticidad y resistencia a flexión con el fin de determinar su clase resistente. El tercer parámetro que interviene en la asignación de una clase resistente es la densidad, obtenida a partir de la norma UNE EN 384. La citada norma UNE EN 384 establece las relaciones para la obtención del resto de propiedades mecánicas a partir de los obtenidos en el ensayo anterior, y determina el cálculo de los valores característicos que sirven de entrada para la asignación de la clase resistente en la comentada norma UNE EN 338.

Los ensayos y procedimientos para la caracterización de madera estructural de procedencia española se encuentran definidos y estudiados en diversos trabajos, sobre todo en coníferas (Carballo *et al*, 2009; Conde, 2003; Fernández-Golfín *et al*, 1997, 2001 y 2007; Hermoso, 2001; Iñiguez, 2007). En cuanto a la madera de frondosas, el nivel de desarrollo de los trabajos de caracterización estructural es mucho menor, siendo el eucalipto la única especie de procedencia española que tiene asignada una clase resistente.

Trabajos portugueses, como los desarrollados por Feio *et al*. (2004a y 2004b), abordan la caracterización de la madera de castaño a partir de probetas de pequeñas dimensiones, con madera libre de defectos. La ausencia de una caracterización de madera de tamaño estructural de pequeña y mediana escuadría de madera de castaño de procedencia española hace necesaria la aplicación de las metodologías normativas ampliamente utilizadas en otras especies para profundizar en el conocimiento de las propiedades físicas y mecánicas de la especie y poder afrontar su inclusión en la normativa europea como material de construcción, además de evaluar la adecuación de la normativa actual en cuanto a procedimientos, cálculos y metodologías de ensayo a esta especie.

Por este motivo, el presente trabajo tiene como objetivo la aplicación de la normativa y los procedimientos citados con el fin de caracterizar la madera aserrada de castaño de procedencia asturiana para uso estructural, obteniendo una clase resistente y evaluando la adecuación para esta especie de algunos cálculos y relaciones establecidas en la norma.

2. Material y métodos

2. 1. Descripción de la muestra y acondicionamiento

La muestra está formada por un total de 260 probetas de madera aserrada de castaño procedentes de Asturias (Norte de España), siendo 130 de ellas de dimensiones 40x100x2500 mm y las 130 restantes de dimensiones 40x150x3500 mm. Estas probetas forman parte de un muestreo a nivel estatal, con varias procedencias y mayor número de muestras, cuyos resultados permitirán afrontar la inclusión de la madera de castaño de procedencia española en la normativa europea.

Las probetas fueron acondicionadas en cámara bajo condiciones normalizadas de humedad y temperatura (65% H y 20°C), con el fin de alcanzar un contenido de humedad homogéneo de la muestra en torno al 12%.

2. 2. Obtención de las propiedades físicas y mecánicas.

Los ensayos mecánicos fueron realizados en el laboratorio PEMADE, en la Escuela Politécnica Superior de Lugo (Universidad de Santiago de Compostela), en un banco de ensayos múltiple con cuatro actuadores, de 200 y 600 kN, de la firma *MicroTest* y calibración de las células de carga y extensómetros con distintivo ENAC, según la norma EN 408:2004. Cada probeta se sometió a flexión colocándola sobre dos apoyos, a una distancia de 18 veces la altura de la sección, y aplicando dos cargas iguales y simétricas en el tercio central de la luz. La carga se aplicó a velocidad constante de recorrido, midiendo la deformación durante el tramo elástico de comportamiento del material en el centro de la luz en dos puntos: en el canto inferior de la probeta y a la altura de la fibra neutra, por ambas caras de la viga. La primera deformación se utiliza para el cálculo del módulo de elasticidad global $E_{m,g}$ (deformación con respecto a la distancia entre apoyos) y la segunda para el módulo de elasticidad local $E_{m,l}$ (deformación únicamente de la zona central, de longitud igual a 5 veces la altura de la sección, libre de esfuerzos cortantes). Una vez sobrepasado el tramo elástico, se llevó la probeta hasta la rotura con el fin de conocer la carga máxima aplicada y realizar el cálculo de la resistencia a flexión (f_m). Una vez finalizado el ensayo, fue identificado el punto de inicio de la rotura y la causa de la misma, y fue extraída una rebanada libre de defectos lo más cercana posible a la sección de rotura para la determinación de la densidad y humedad de la pieza.

El contenido de humedad de las probetas fue medido en dos etapas diferentes. Una primera durante la realización de la clasificación visual de las probetas mediante xilohigrómetro, modelo RTU 600 de *Gann*, de acuerdo con lo estipulado en la norma EN 13.183-2. A partir de este contenido de humedad, del peso total de la probeta medida con precisión de 1 gramo, y del volumen de la misma midiendo sus dimensiones con regla graduada y flexómetro con precisión de 1 milímetro, se determinó la densidad global. La segunda etapa de medición del contenido de humedad tuvo lugar justo después de la realización del ensayo de flexión hasta rotura. Para esto se extrajo una rebanada libre de defectos, pesada con precisión de 0,01 gramos y medidas sus dimensiones con calibre con precisión de 0,01 milímetros, y se secó en estufa según la norma EN 13.183-1 con el fin de conocer su contenido de humedad. A partir de este contenido de humedad y de las dimensiones y peso de la rebanada, se determinó la densidad local de cada probeta.

2. 3. Cálculo de valores característicos

Tanto el módulo de elasticidad local $E_{m,l}$ como el global $E_{m,g}$ se calcularon mediante las expresiones indicadas en la norma EN 408:2004, a partir del gráfico carga-deformación obtenido en el ensayo dentro del tramo elástico (Ecuaciones (1) y (2) respectivamente). La resistencia a flexión f_m se calculó a partir de la fuerza máxima aplicada en el momento de la rotura de la probeta y sus parámetros geométricos (Ecuación (3)).

$$E_{m,l} = \frac{al_1^2(F_2 - F_1)}{16I(w_2 - w_1)} (N / mm^2) \quad (1)$$

donde

a = distancia entre un punto de carga y el apoyo más próximo, en mm
 l_1 = longitud base de medida, (cinco veces la altura de la sección), en mm
 I = momento de inercia de la sección, en mm⁴
 $F_2 - F_1$ = incremento de carga en newtons en la recta de regresión con un coeficiente de regresión de 0,99 o mejor, y;
 $w_2 - w_1$ = incremento de la deformación en mm, correspondiente al tramo $F_2 - F_1$

$$E_{m,g} = \frac{l^3(F_2 - F_1)}{bh^3(w_2 - w_1)} \left[\left(\frac{3a}{4l} \right) - \left(\frac{a}{l} \right)^3 \right] (N / mm^2) \quad (2)$$

donde

a = distancia entre un punto de carga y el apoyo más próximo, en mm
 l = luz en flexión, en mm (18 veces la altura "h")
 b, h = anchura y altura de la sección, en mm.
 $F_2 - F_1$ = incremento de carga en newtons en la recta de regresión con un coeficiente de regresión de 0,99 o mejor, y;
 $w_2 - w_1$ = incremento de la deformación en mm, correspondiente a $F_2 - F_1$

$$f_m = \frac{3F_{m\acute{a}x}a}{bh^2} (N / mm^2) \quad (3)$$

donde

$F_{m\acute{a}x}$ = carga de rotura, en N
 a = distancia entre un punto de carga y el apoyo más próximo, en mm
 b, h = anchura y altura de la sección, en mm

La norma EN 384:2010 establece las correcciones necesarias para el módulo de elasticidad y la densidad en función del contenido de humedad. De acuerdo con esta norma, el valor del módulo de elasticidad global y local fue corregido al contenido de humedad de referencia del 12%, de forma que cambie un 1% por cada 1% de variación del contenido de humedad, aumentando su valor si los datos se corrigen para un contenido de humedad mayor y viceversa. El valor de densidad fue corregido al mismo contenido de humedad de referencia del 12%, disminuyendo su valor un 0,5% por cada variación del 1% de contenido de humedad cuando éste sea mayor del 12%, y viceversa.

La norma indica tres coeficientes a aplicar al valor de la resistencia característica: corrección al canto de referencia (k_h), corrección por clasificación con métodos mecánicos (k_v) y corrección para el tamaño de muestra (k_s). La corrección por canto toma como referencia una altura de sección (h) de 150 mm, por lo que únicamente se aplicó a la muestra de sección 40x100 mm, con el fin de referenciar todas las probetas a la altura h especificada y tener valores comparables entre sí. k_v toma un valor de 1 siempre que se realice clasificación visual (el caso del presente trabajo) y no mecánica, en cuyo caso tomaría un valor de 1,12. La corrección por tamaño de muestra, k_s , penaliza el valor de la resistencia en función del número de muestras y número de probetas de cada muestra, tomando un valor de 1 cuando se tienen al menos 5 muestras con 100 probetas como mínimo en cada una.

El coeficiente k_s tiene como objetivo minimizar el riesgo de considerar un valor de resistencia mayor al que puedan tener realmente piezas puntuales, siempre dentro de los márgenes de seguridad al 95% que indica el 5º percentil, penalizando más el valor de resistencia cuantas

menos muestras y menor número de probetas sean ensayadas. Esta penalización, que es necesaria a la hora de afrontar la inclusión de la especie en la norma europea EN 1912 mediante un muestreo estatal, no fue considerada en el presente trabajo. El objetivo fue el de estudiar y relacionar los valores reales de la madera de castaño de una única procedencia, sin verse afectados por coeficientes de penalización de tamaño y procedencia de la muestra.

A partir de los datos obtenidos en el ensayo mecánico se calcularon los valores medios del módulo de elasticidad y los valores característicos, ajustados al 5º percentil, de resistencia a flexión y densidad. En base a las ecuaciones que define la norma fueron calculadas el resto de propiedades: resistencia a tracción (4) y a compresión (5) paralela a la fibra, resistencia a tracción (6) y compresión (7) perpendicular a la fibra, módulo de elasticidad característico paralelo a la fibra (percentil 5º) (8), módulo de elasticidad medio perpendicular a la fibra (9) y módulo de elasticidad transversal o módulo de cortante (10). La norma establece ecuaciones diferentes para coníferas y para frondosas. En este trabajo se consideraron únicamente las referentes a frondosas.

$$f_{t,0,k} = 0,6f_{m,k} \quad (4)$$

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

$$f_{t,90,k} = 0,6N / mm^2 \quad (6)$$

$$f_{c,90,k} = 0,015\rho_k \quad (7)$$

$$E_{0,05} = 0,84E_{0,medio} \quad (8)$$

$$E_{90,medio} = E_{0,medio} / 15 \quad (9)$$

$$G_{medio} = E_{0,medio} / 16 \quad (10)$$

A pesar de que el módulo de elasticidad transversal o módulo de cortante (G_{medio}) puede calcularse a partir de la expresión (10) dada en la norma, se realizaron ensayos sobre 123 probetas de sección 40x150 mm con el fin de conocer su valor real. Siguiendo los procedimientos de ensayo según la norma EN 408:2004 y con el método de la luz única, fue obtenido el módulo de elasticidad aparente ($E_{m,app}$), necesario para el cálculo G_{medio} , según la expresión:

$$G = \frac{k_G h^2}{l_1^2 \left[\frac{1}{E_{m,app}} - \frac{1}{E_{m,l}} \right]} \quad (11)$$

donde

$k_G=1,2$ para secciones rectangulares o cuadradas

h = altura de la sección, en mm

l = luz en flexión, en mm

$E_{m,app}$ = módulo de elasticidad aparente, en N/mm²

$E_{m,l}$ = módulo de elasticidad local, en N/mm²

3. Resultados

Se obtuvieron los valores de módulo de elasticidad y de resistencia a flexión de un total de 126 probetas ensayadas de la sección I (40x100 mm) y de 124 probetas de la sección II (40x150 mm). En la tabla 1 se muestran los valores medios de estas variables:

Sección (mm)	Nº de probetas	$E_{m,l}$ (kN/mm ²)	CV (%)	$E_{m,g}$ (kN/mm ²)	CV (%)	f_m (N/mm ²)	CV (%)	$f_{m,k}$ (N/mm ²)
(40x100)	126	13,09	13,90	12,10	12,15	53,14	26,45	29,17
(40x150)	124	12,15	16,94	11,12	15,41	43,63	23,60	25,30
Todas	250	12,63	15,76	11,61	14,35	48,43	30,41	26,28

Tabla 1. Valores medios del módulo de elasticidad local ($E_{m,l}$) y global ($E_{m,g}$) y de la resistencia a flexión (f_m), y valor característico (5º percentil) de la resistencia a flexión ($f_{m,k}$)

El valor de la densidad se obtuvo a partir de la pesada y la medición de las dimensiones de probetas libres de defectos de pequeño tamaño, extraídas tras el ensayo mecánico próximas a la sección de rotura, corrigiendo el valor a un contenido de humedad de referencia del 12%. En la tabla 2 se muestran los valores medios y característicos (5º percentil) de cada sección y del conjunto de la muestra:

Sección (mm)	Nº de probetas	ρ_{media} (kg/m ³)	CV (%)	ρ_k (kg/m ³)
(40x100)	126	592,55	8,79	499,69
(40x150)	124	586,19	8,38	499,32
Todas	250	589,39	8,59	499,95

Tabla 2. Valor medio (ρ_{media}) y característico (5º percentil) (ρ_k) de la densidad.

A partir de los valores de módulo de elasticidad, resistencia y densidad obtenidos anteriormente se calcularon los valores del resto de las propiedades mecánicas, mediante de las expresiones establecidas en la norma EN 384:2010 para madera de frondosas (Tabla 3).

Sección (mm)	Nº de probetas	$f_{t,0,k}$ (N/mm ²)	$f_{c,0,k}$ (N/mm ²)	$f_{t,90,k}$ (N/mm ²)	$f_{c,90,k}$ (N/mm ²)	$E_{0,05}$ (kN/mm ²)	$E_{90,medio}$ (kN/mm ²)	G_{medio} (kN/mm ²)
(40x100)	126	17,50	22,81	0,6	7,50	10,99	0,87	0,82
(40x150)	124	15,18	21,40	0,6	7,49	10,21	0,81	0,76
Todas	250	15,77	21,77	0,6	7,50	10,61	0,84	0,79

Tabla 3. Valores del resto de propiedades mecánicas calculadas según EN 384.

La tabla 4 muestra el valor medio del módulo de cortante obtenido en los ensayos de las 123 probetas de sección 40x150 mm, clasificadas en grupos según el corte que presentasen (radial, tangencial o mixto), así como la relación entre $E_{m,l}$ y G . Tras un análisis de varianza y de diferencia entre medias se obtuvo como resultado que no existían diferencias significativas entre los valores medios del módulo de cortante de cada grupo de probetas (en función del tipo de corte observado).

Tipo de corte	N	G (N/mm ²)	CV (%)	Relación $E_{m,l}/G$
Radial	25	1275 ^(a)	18	9,48
Tangencial	84	1193 ^(a)	30	11,21
Mixto	14	1215 ^(a)	22	10,92
Todos	123	1212	27	10,82

Tabla 4. Valores medios de G por tipo de corte observado en la probeta y relación $E_{m,l}/G$. La diferencia de medias es significativa a nivel 0,05.

Tras el ensayo mecánico fue evaluada la causa última de la rotura, anotando la singularidad, defecto o característica de la probeta desencadenante de la misma. Así, se establecieron cuatro categorías de causa de rotura: nudo, desviación de la fibra, agotamiento a tracción y otras causas (torsiones, fendas, irregularidades dimensionales, etc.). En la categoría *nudo* se incluyen también aquellas probetas cuyo punto de rotura haya empezado en una zona con desviación local de la fibra debida a la cercanía de un nudo. La categoría *desviación de la fibra* abarca aquellas cuya causa de rotura haya sido una desviación general de la fibra, y no una desviación de fibra local alrededor de un nudo, mientras que la categoría *tracción* incluye las probetas cuyo agotamiento se haya producido por un esfuerzo de tracción sin influencia de nudos cercanos o desviaciones significativas de las fibras.

En la tabla 5 se muestran los porcentajes de rotura en función del tipo de singularidad o característica que lo provocó para un total de 164 probetas evaluadas (124 de sección 40x150 mm y 40 de sección 40x100 mm):

Causa de la rotura	Nudo	Desviación de la fibra	Tracción	Otros	Total
Número de probetas	72	27	56	9	164
Porcentaje	44%	16%	34%	6%	100%

Tabla 5. Clasificación de las probetas evaluadas por causa de rotura

Se realizó un análisis de varianza para detectar las posibles diferencias entre las medias de la resistencia en función de la causa de la rotura, y fueron evaluadas mediante una comparación múltiple mediante el método de la *diferencia mínima significativa* (DMS).

Causa de rotura	f_m	σ	Límite inferior ¹	Límite superior ¹
Nudo	41,62 ^(a)	11,97	38,81	44,43
Desv. fibra	47,13 ^{(a)(b)}	10,83	42,84	51,41
Tracción	54,09 ^(b)	10,14	51,37	56,80
Otros	43,94 ^{(a)(b)}	10,27	36,04	51,84

Tabla 6. Diferencia entre medias mediante DMS de la resistencia a flexión por cada causa de rotura. La diferencia de medias es significativa a nivel 0,05. ¹Intervalo de confianza del 95%.

4. Discusión

Los valores de módulo de elasticidad, resistencia a flexión y densidad permiten clasificar la muestra analizada en una clase resistente. Los valores obtenidos permitieron clasificar estructuralmente la madera de castaño de procedencia asturiana en una clase resistente D24. En todos los casos, los parámetros indicativos de la clase resistente son la resistencia a flexión, $f_{m,k}$ (limitada a poblaciones con una resistencia menor de 30 N/mm² y mayor de 24 N/mm²) y la densidad, ρ_k (con un rango de valores entre 485 y 530 kg/m³). El valor de módulo de elasticidad obtenido de los ensayos experimentales fue en todos los casos muy superior a los establecidos para la clase resistente D24 (ver tabla 7).

Los valores del resto de las propiedades mecánicas calculados según la norma EN 384:2010 resultaron dentro de la misma clase resistente D24 o superior, salvo el valor de compresión perpendicular a la fibra $f_{c,90,k}$, con un valor dentro del rango de la clase D18. El valor característico de la densidad para ambas secciones fue de aproximadamente 499 kg/m³, lo cual indica una clase resistente D24, mientras que aplicando la ecuación (7) para el cálculo de $f_{c,90,k}$, se obtiene de éste un valor en torno a 7,50 N/mm², en la zona inferior del rango de la clase D18. Ya que este

parámetro depende exclusivamente de la densidad característica, resulta incongruente la distinta asignación de clase de este parámetro con respecto a la de la única variable de la que depende.

	D18	D24	D30	D35	D40	D50	D60	D70
<i>Resistencia (N/mm²)</i>								
$f_{m,k}$	18	24 ⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	30	35	40	50	60	70
$f_{t,0,k}$	11	14	18	21	24	30	36	42
$f_{t,90,k}$	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
$f_{c,0,k}$	18	21	23	25	26	29	32	34
$f_{c,90,k}$	7,5	7,8	8,0	8,1	8,3	9,3	10,5	13,5
<i>Rigidez (kN/mm²)</i>								
$E_{0,medio}$	9,5	10	11	12 ⁽²⁾⁽³⁾	13 ⁽¹⁾	14	17	20
$E_{0,05}$	8	8,5	9,2	10,1	10,9	11,8	14,3	16,8
$E_{90,medio}$	0,63	0,67	0,73	0,80	0,86	0,93	1,13	1,33
G_{medio}	0,59	0,62	0,69	0,75	0,81	0,88	1,06	1,25
<i>Densidad (kg/m³)</i>								
ρ_k	475	485 ⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	530	540	550	620	700	900
ρ_{media}	570	580	640	650	660	750	840	1080

Tabla 7. Clases resistentes para madera de frondosas según la norma EN 338:2010. Sombreados los valores correspondientes al rango de la clase resistente donde se encuadran los resultados para cada sección; ⁽¹⁾sección I, ⁽²⁾sección II, ⁽³⁾todas las probetas

El valor calculado según la norma EN 384:2010 para el módulo de cortante o módulo de elasticidad transversal G , fue de 0,82 kN/mm² para la sección I, de 0,76 kN/mm² para la sección II y de 0,79 kN/mm² considerando todas las probetas en conjunto, muy por encima del valor del parámetro de la clase resistente asignada D24 (0,62 kN/mm²). Al comparar este valor calculado con los resultados obtenidos en el ensayo de flexión sobre 123 probetas, se encuentran claras diferencias, resultando los valores reales significativamente superiores a los estimados (ver figura 1).

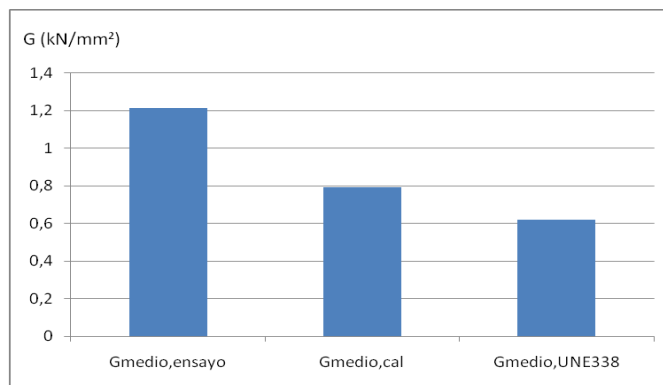


Figura 1. Valor del módulo de elasticidad transversal (G_{medio}) obtenido en el ensayo mecánico, calculado según EN 384:2010 y el correspondiente a la clase D24 de la norma EN 338:2010.

La norma EN 384:2010 establece una relación teórica entre el módulo de elasticidad local y el módulo de elasticidad transversal ($E_{m,l}/G$) igual a 16 (ecuación 10). El valor de G corresponde al valor medio de la propiedad en dirección radial y tangencial, entre los cuales existen en coníferas claras diferencias, siendo la relación $E_{m,l}/G = 14,9$ y $E_{m,l}/G = 17,25$ respectivamente (Baño, 2009).

Si bien G es teóricamente mayor en la dirección radial que en la tangencial, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre las probetas con diferentes cortes, observándose de cualquier forma una ligera tendencia, resultando ser igual a 1,28 kN/mm² para las de corte radial y a 1,19 kN/mm² las de corte tangencial. Las relaciones $E_{m,l}/G$ obtenidas fueron igual a 9,48, para la dirección radial y 11,21 para la tangencial, lo cual indica la subestimación en el cálculo de este parámetro que se produce al emplear la relación indicada en la normativa, que indica una relación de 16.

Al analizar los defectos o singularidades causantes en último término de la rotura de la pieza en el ensayo mecánico se observa como un alto porcentaje (44%) fue debido a la presencia de nudos y la desviación de fibra local provocada por éste, seguido de un 34% cuya rotura se produjo por

agotamiento a tracción y un 16% por desviación general de la fibra (no local). Se encontraron diferencias entre los valores de resistencia de aquellas probetas cuyo fallo fue provocado por nudos y las fracturadas por tracción pura, con un valor significativamente menor en las primeras. Esta clara y lógica diferencia, junto con el alto porcentaje de roturas debido a la presencia de nudos, pone de manifiesto la importancia de establecer criterios realistas y adecuados a la especie en las clasificaciones visuales.

5. Conclusiones

Los valores característicos obtenidos para el módulo de elasticidad, resistencia a flexión y densidad para el conjunto de la muestra fueron 12,63 kN/mm², 26,28 N/mm² y 499,95 kg/m³ respectivamente, lo cual permite asignar la madera de castaño de procedencia asturiana y secciones 40x100 y 40x150 mm a una clase resistente D24.

Las expresiones establecidas en la norma EN 384:2010 para el cálculo de otras propiedades mecánicas podrían ser susceptibles de revisión para su empleo en esta especie, al observar como el valor obtenido al calcular la compresión perpendicular a la fibra $f_{c,90,k}$ resulta incoherente y el módulo de elasticidad transversal G calculado no se ajusta al valor real obtenido en los ensayos.

La presencia de nudos fue la singularidad causante de un mayor porcentaje de rotura de las probetas, presentando éstas un valor de resistencia significativamente menor que en las que se produjo agotamiento a tracción pura.

Los resultados obtenidos en el presente trabajo, mediante el análisis de las muestras de procedencia asturiana, sirven de base para el conocimiento de las propiedades de esta madera, y serán contrastados con los que se obtendrán en un futuro cercano a partir del análisis del muestreo a nivel nacional.

Agradecimientos

Ministerio de Ciencia e Innovación. Proyecto Singular Estratégico VALOCAS, financiado por la Consejería de Educación y Ciencia del Principado de Asturias.

Plan Nacional del Ministerio de Ciencia y Tecnología, proyecto de investigación AGL2009-11311

Dirección Xeral de I+D de la Xunta de Galicia, proyecto de investigación 09MDS016291PR

Referencias Bibliográficas

Baño, V. (2009). "Análisis mediante simulación numérica de la pérdida de resistencia de la madera por la presencia de nudos" Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.

Carballo, J.; Hermoso, E.; Fernández-Golfín, I. (2009). "Mechanical properties of structural maritime pine sawn timber from Galicia (*Pinus pinaster* Ait. ssp. *atlantica*). *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 18(2), 152-158.

Conde, M. (2003). "Caracterización de la madera estructural de *Pinus nigra* Subsp. *salzmannii*", Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.

Feio, A.; Machado, J.; Lourenço, P. (2004a) "Caracterização da resistência da madeira de Castanho à tracção paralela ao fio". *CIMAD'04, 1º Congresso Ibérico*. Guimarães, Portugal, UM, 343 - 352.

Feio, A.; Machado, J.; Lourenço, P. (2004b) "Caracterização de propriedades da madeira de Castanho na direcção perpendicular ao fio – recurso a técnicas destrutivas e não destrutivas de ensaio". *CIMAD'04, 1º Congresso Ibérico*. Guimarães, Portugal, UM, 353-362.

Fernández-Golfín, J.I.; Díez, M.R.; Gutiérrez, A. (1997). “Caracterización mecánica de la madera aserrada de pino silvestre de los sistemas Central e Ibérico mediante probetas de tamaño estructural”, *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 6 (1 y 2), 183-215.

Fernández-Golfín, J.I.; Díez, M.R.; Baonza, M.V.; Gutiérrez, A.; Hermoso, E.; Conde, M.; Van den Eynde, V. (2001). “Caracterización de la calidad y las propiedades de la madera de pino laricio (*Pinus nigra*)”, *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 10(2), 311-332.

Fernández-Golfín, J.I.; Díez-Barra, M.R.; Hermoso, E.; Mier, R. (2007). “Mechanical characterization of visually classified, small-diameter laricio pine round timber” *Spanish Journal of Agricultural Research*, 5(3), 304-311.

Hermoso, E. (2001). “Caracterización mecánica de la madera estructural de *Pinus sylvestris* L.”, Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.

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.

UNE-EN 338:2010. “Madera estructural. Clases resistentes”.

UNE-EN 384:2010. “Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad”.

UNE-EN 408:2004. “Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas”.

UNE-EN 1912:2005. “Madera estructural. Clases resistentes. Asignación de calidades visuales y especies”.