

Madera estructural de pino silvestre: caracterización mecánica

E. Hermoso *, J.I. Fernández-Golfín, R. Díez

CIFOR-INIA. Apartado 8111. 28080 Madrid.

hermoso@inia.es

RESUMEN

Se aportan los resultados del estudio de caracterización mecánica del pino silvestre considerando las últimas modificaciones de la normativa. Para ello se adaptan los datos procedentes de estudios anteriores y se incluyen nuevos muestreos que complementan las zonas de procedencia y las dimensiones de las piezas estructurales. En cada una de las piezas se evalúa la calidad mediante los criterios de la clasificación visual definidos en la norma española UNE 56.544 y se ensayan hasta la rotura según la norma prEN 408 de determinación de las propiedades físico-mecánicas, obteniendo los valores característicos según las indicaciones de la norma EN 384.

Se extraen conclusiones sobre la asignación de clases resistentes, la efectividad de variables y parámetros utilizados actualmente en la determinación de la calidad, y se comparan los resultados con estudios similares realizados sobre otras especies españolas de pino, así como con el pino silvestre de procedencia europea.

Palabras clave: *Pinus sylvestris* L., madera estructural, clasificación de madera.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo surge en respuesta a la necesidad de completar el estudio iniciado con la madera estructural de pino silvestre bajo el objetivo de su caracterización mecánica (Fernández-Golfín *et al.*, 1997; AITIM, 1994). Mediante dichos trabajos se han determinado una serie de propiedades del material relacionadas con su comportamiento estructural, entre las que se encuentra principalmente la resistencia a la flexión, el módulo de elasticidad longitudinal en flexión y la densidad, para poder a partir de ellas asignar madera de distintas calidades a clases resistentes.

* Autor para correspondencia:

Recibido: 7-5-02

Aceptado para su publicación: 16-7-02

Por esta razón, se disponen de datos anteriores pertenecientes a las procedencias de Valsain, Rascafría, Navafría, Navaleno, Quintanar y Álava, los cuales han sido incluidos en el presente estudio.

Fueron las modificaciones efectuadas sobre la normativa EN 384, encargada de establecer el proceso de caracterización mecánica de una especie de madera, lo que obligó a la adaptación del muestreo del pino silvestre. Así, las razones principales de las que adolecían los datos anteriores, y por las cuales se originó este estudio, son:

- Se basaban en un único tamaño de ensayo, $150 \times 50 \times 3000$ mm, lo que contraviene lo establecido en la más reciente versión de la norma EN 384 (2000), que exige en la muestra la representatividad del rango de secciones para los cuales la norma es aplicable.
- La representación de zonas de procedencia de madera de esta especie era incompleta. De nuevo se establecía en la norma EN 384 que la muestra debe reflejar los posibles orígenes de la madera.
- La caracterización hacia uso de la norma española de clasificación visual UNE 56.544, que posteriormente fue modificada de forma que los datos disponibles tuvieron que ser reclasificados bajo los nuevos criterios. Esto fue posible debido a que permanecen registrados tanto la sección de rotura como las singularidades generales de cada pieza.

Como solución el presente trabajo complementa con nuevos muestreos y dimensiones de las regiones del Pirineo Navarro y de los Montes Universales, efectuados de acuerdo con los requisitos de la normativa, además de los datos anteriores reelaborados según las exigencias de la norma UNE 56.544.

Esta noción de la calidad en la madera está promovida desde Europa donde desde comienzos de los años noventa se ha suscitado la búsqueda de la calidad en todos los sectores, y en concreto también en la construcción, afectando en cascada tanto a productos y procesos como actividades.

El Comité Europeo de Normalización CEN TC 124 mediante sus Comités Técnicos, se encarga de dictar las normas que afectan a los productos destinados al mercado estructural, como la madera (Fernández-Golfín *et al.*, 1998). Son sus normas EN 408 de ensayos estructurales, EN 384 de cálculo de valores característicos y EN 338 de clases resistentes, las que principalmente establecen la metodología de la caracterización mecánica de las diversas especies de madera estructural comercializada en la Unión Europea.

Precisamente y debido a la circunstancia del mercado europeo, la caracterización de una madera de acuerdo a esos postulados supone una necesidad de supervivencia competitiva para su libre comercio. La manera de homologar los resultados de caracterización obtenidos para una madera se consigue con la introducción de las clases resistentes según calidades en la norma EN 1912. Dicha norma recoge el resumen de las asignaciones resistentes por especies y calidades según procedencias.

Bajo este contexto, se establece como objetivo la determinación de las características mecánicas de la madera de tamaño estructural de *Pinus sylvestris* L. según calidades visuales, así como el estudio del efecto que pueden tener las distintas procedencias o dimensiones de las piezas.

También constituyen otros objetivos la estimación de variables y la evaluación de ensayos de clasificación más adecuados en la determinación de la calidad por métodos no

destructivos, además de la comparación con los resultados obtenidos de diferentes especies españolas y procedencias europeas de pino silvestre.

REVISIÓN NORMATIVA

La base de la caracterización mecánica reside en la normativa europea; por eso en este punto y debido a las continuas modificaciones que ha sufrido, se pretende dar una pincelada de su evolución hasta el estado actual.

Los Comités Europeos a través de sus Comités Técnicos son los encargados de la normalización en los distintos campos, existiendo dos principales en el sector de la madera estructural: el CEN TC 250 que estableció el “Eurocódigo 5” y el CEN TC 124 relacionado con la madera aserrada estructural y que incluye, entre otras normas:

EN 336: sobre dimensiones preferentes y tolerancias.

EN 338: sobre clases resistentes.

EN 384: sobre el método de cálculo de los valores característicos.

EN 408: sobre los métodos de ensayo de las propiedades mecánicas y físicas.

EN 14081: sobre los requisitos necesarios para la clasificación visual y de máquina.

EN 1912: sobre la asignación de especies y calidades por procedencias.

La normativa que regula los procedimientos de ensayo no debe ser inmutable sino evaluar constantemente la inclusión de mejoras que hayan podido surgir desde la experiencia adquirida con el tiempo.

La mayor evolución se ha producido en la determinación del módulo de elasticidad a flexión (dado por prEN 408), suscitada por la búsqueda de precisión, fiabilidad y comodidad en los procesos de ensayo y resultados. Además hay que tener en cuenta que el módulo de elasticidad es una variable clasificadora del material, por tanto su determinación es clave en la asignación de calidades a clases resistentes según EN 338.

En sus comienzos (1995), el método de determinación del módulo de elasticidad en flexión estática que aporta la norma EN 408 consiste en la aplicación de dos cargas centradas sobre la pieza con una distancia entre los soportes de apoyo de 18 veces la altura de la sección (h). La medición de la flecha se efectúa en el centro del vano de aplicación de las cargas, tomando una longitud de referencia de cinco veces la altura de la sección. Se trata de un módulo elástico puro, es decir, sin intervención de los cortantes, y al que denominamos E_1 (Módulo de Elasticidad Local).

A este tipo de ensayo se le achacan diversos inconvenientes que surgen de la ambigüedad en la descripción del ensayo. Por ejemplo, la situación del medidor no está exactamente especificada ya que no señala si se debe colocar en la parte traccionada, en la comprimida o en el centro (Boström, 1999). Tampoco se detalla el lugar preciso de sujeción de la percha ¹ que sostiene al deformador, ni si la medición debe realizarse en una o en las dos caras de la pieza.

¹ Dispositivo colgado de la cara para soporte del instrumento de medición.

Las posibles interpretaciones afectan al modo en el que se realiza el ensayo, pudiendo influir en el valor final del módulo de elasticidad que junto a la alta variabilidad que se introduce en la medición sobre una luz tan pequeña, conducen a errores considerables que provocan la búsqueda de métodos de ensayo más fiables.

En esta situación se llega a la introducción en la norma prEN 408 de un nuevo método de determinación del módulo de elasticidad en flexión denominado global (E_g). Este adjetivo está relacionado con la novedad que aporta respecto al anterior y es que se mide la flecha producida en la distancia de 18 veces la altura de la sección, la misma que los apoyos.

Sin embargo, de nuevo no queda clara la posición del deformador ni la necesidad de medir en ambas caras, por lo que se incorpora el tercer tipo de módulo de elasticidad, el E_g de canto (E_{gt}) que toma la medida en la misma longitud que el E_g pero sobre el canto del centro de la pieza (parte traccionada). La determinación del E_{gt} aporta mayor sencillez y rapidez al ensayo, primordialmente por poder evitar el uso de perchas y disminuir posibles malinterpretaciones.

En este estudio se han realizado los tres tipos de ensayos del módulo de elasticidad y recogidos en la norma prEN 408, pese a estar establecido en la norma EN 384 el uso de E_1 para el cálculo de la asignación de valores característicos. La disposición de los deformadores y las distancias necesarias en cada ensayo, se presentan en la figura 1 siguiente.

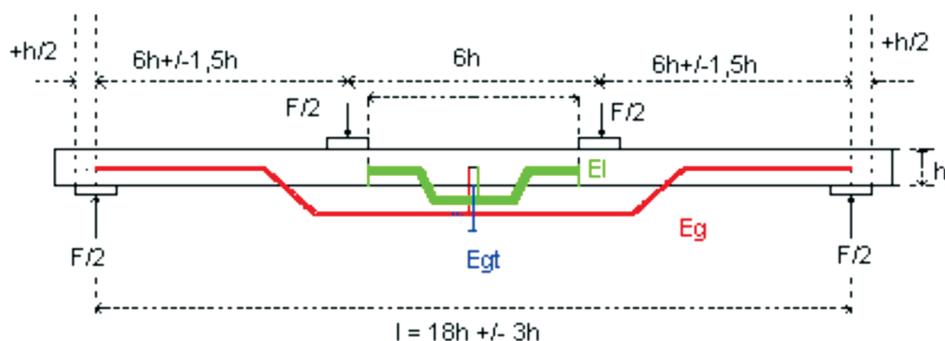


Fig 1.—Ensayos de E_1 , E_g y E_{gt} según prEN 408

Una vez obtenidos los valores de las propiedades clasificadoras (Módulo de elasticidad a flexión (E_1 , E_g , E_{gt}), Tensión de rotura a flexión (f_m) y Densidad (ρ_m) para cada pieza y calculados los valores característicos y medios de las poblaciones en estudio según establece la norma EN 384, se acude con ellos a la norma EN 338 de clases resistentes.

El sistema de clases resistentes consiste básicamente en una serie de categorías definidas cada una de ellas por unos valores mínimos de las propiedades mecánicas y físicas que determinan la pertenencia a esa clase. Surge para favorecer el libre comercio de la madera aserrada dentro de la Unión Europea, con la importante ventaja de admitir la utilización de las normas nacionales de clasificación.

La norma de clasificación visual utilizada en el presente trabajo es la UNE 56.544, la cual emplea como criterios de calidad las singularidades del material y por tanto constituye una técnica no destructiva. Esta norma española cumple los requisitos de la norma

marco europea EN 14081-1 (que sustituye a la anterior EN 518 posteriormente sustituida por EN TC 124) creada para asentar los principios básicos de calidad en la clasificación resistente y clasifica en Madera Estructural de primera (ME1), de segunda (ME2) y en caso de no pertenecer a ninguna de las dos, se consideran Rechazos.

Bajo esta situación, solamente se requiere una norma de unión entre las clasificaciones visuales de cada país con las clases resistentes, y para este fin se estableció la EN 1912, que permite al usuario disponer de numerosas especies entre las que elegir la clase resistente que necesita y al proveedor ofrecer una mayor variabilidad.

MATERIAL Y MÉTODOS

El acopio de nuevos muestreos debía atender a los requisitos impuestos en la normativa, según se apuntó en la introducción, y para eso en primer lugar se acudió al estudio de las regiones de procedencia de *Pinus sylvestris* L. según Catalán *et al.* (1991). De ellas se procedió a elegir la muestra que completase la representación de zonas productoras de madera de pino silvestre, en donde se definen 17 regiones, de las que sólo 11 son consideradas de explotación, siendo las 6 restantes zonas calificadas como relícticas o de conservación.

De las 11, las dos pertenecientes al ecotipo Catalán no pudieron ser muestreadas por dificultades de diversa naturaleza, quedando distribuida la muestra de la siguiente manera:

Representando al Sistema Central, compuesta por dos regiones, se escogió la Sierra de Guadarrama (Región 10), formada por las muestras de Navafría, Rascafría y Valsaín.

Representando al Sistema Ibérico, constituida por cuatro regiones, se tienen tres de ellas: el Alto Ebro (Región 2: Álava), la Montaña Soriano Burgalesa (Región 8: Navaleño y Quintanar) y los Montes Universales (Región 12: Cuenca).

Representando a los Pirineos, su única región: el Pirineo Navarro (Región 3: Navarra).

Por necesidades en la obtención de las dimensiones requeridas, se dispuso de dos tipos de muestreo, el realizado en el monte desde el árbol en pie y el recogido directamente en serrería que corresponde a las muestras de Navarra y Cuenca.

Los árboles del monte fueron previamente señalados y tras su apeo, desramados y descortezados. Las trozas extraídas de los rollizos, se transportaron al aserradero, lugar donde también se efectuó un segundo muestreo, y se cortaron quedando listas para el secado y el cepillado, resultando un total de 1661 piezas de tamaño estructural de pino silvestre de dimensiones que variaban entre 40-70 mm de anchura de sección, 100-200 mm de altura de sección y longitudes de 2, 3 y 4 m que se trasladaron a las dependencias de los laboratorios del CIFOR-INIA.

Tras la clasificación visual de las piezas en calidades ME1, ME2 o Rechazo de acuerdo con sus singularidades (nudos, fendas, desviación general de fibras, entrecasco, médula, etc.) como establece la norma UNE 56.544, se realizó el ensayo según prEN 408 de los módulos de elasticidad, finalizando con la obtención de la tensión de rotura a flexión, la densidad y la medida del espesor de los anillos.

Con estos datos se procedió al cálculo de los valores característicos y medios de las propiedades mecánicas de la especie según EN 384, para cada pieza y para el total, introduciéndose estos últimos en la norma EN 338 y obteniendo las clases resistentes asignadas a cada calidad visual.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 1 se presenta el resumen de la muestra ensayada, aportando el número de piezas que componen cada sección, por zonas de procedencia y detallada según las clases visuales estudiadas (ME1, ME2 y Rechazos). Designadas como “otras” se consideran las piezas que no tienen dimensiones exactas para pertenecer a uno de los grupos, pero de valores cercanos a 150 × 50 mm. En ella se observa el cumplimiento de los requisitos de la norma de considerar al menos tres secciones diferentes representativas y de reflejar fuentes de variación como la procedencia.

En los tamaños analizados parece presentarse una variable de óptimo intermedio, ya que las dimensiones que muestran menores rendimientos de ME1 y Rechazos son tanto las pequeñas como las grandes. La causa puede encontrarse en que la obtención de piezas de tamaño pequeño suele ser a partir de puntas y las grandes incluyen la médula y según la norma se clasifican directamente como ME2. Por eso, dimensiones próximas a 150 × 50, se consideran que dan una estimación de los rendimientos en calidades no influidos por estas desventajas.

En la Tabla 2 se recogen los rendimientos visuales por procedencias y según la altura de la troza de extracción de las vigas. En los muestreos realizados sobre el aserradero directamente se desconoce la altura de procedencia de la pieza, por ello tanto para Cuenca como para Navarra se aportan exclusivamente los rendimientos generales.

De los análisis de la calidad visual efectuados según procedencias, no se observan diferencias significativas entre sus rendimientos, excepto para Valsain y Cuenca. La primera es una muestra procedente de un monte gestionado y aprovechado excelentemente, además de realizarse un acopio bajo criterios netamente industriales y por estas dos razones se usan sus datos con precaución. En Cuenca puede existir influencia debido a que son zonas de altitudes y suelos límites para el crecimiento del pino silvestre, proporcionando madera de calidad inferior a la que cabría esperar.

En cuanto la significación de la altura de procedencia de las piezas, se manifiestan los mismos resultados que ya se obtuvieron en otros estudios con otras especies (Díez *et al.*, 2001): el mayor número de vigas de primera calidad se consiguen a partir de trozas bajas y por tanto de diámetro más grande.

Los valores resultantes de las propiedades clasificadoras según calidades, se muestran en la Tabla 3 siguiente.

Como era de esperar, el estudio de las propiedades clasificadoras presenta valores mejores en las calidades altas para cualquiera de las procedencias que se considere. No destaca ninguna región en concreto por su superioridad de valores en todas las propiedades, sino que cada una sobresale por algo concreto como por resistencia (Sierra de Guadarrama y Navarra), por rigidez (Sierra de Guadarrama y Álava) o por densidad (Navarra y Álava).

Tabla 1
Descripción de la muestra ensayada (nº de piezas/%)

Sección	Zona	CALIDAD SEGÚN UNE 56.544			TOTAL
		ME1	ME2	Rechazos	
1 100×40 mm	Cuenca	29	55	27	111
	Navarra	9	28	27	64
TOTAL SECCIÓN 1		38/21,8	83/47,4	54/30,8	175
2 100×50 mm	Cuenca	27	57	36	120
	TOTAL SECCIÓN 2		27/22,5	57/47,5	36/30,0
3 150×40 mm	Cuenca	30	60	40	130
	TOTAL SECCIÓN 3		30/23,1	60/46,1	40/30,8
4 150×50 mm	Cuenca	21	77	32	130
	Navarra	25	47	14	86
	Álava	1	3	3	7
	Soria-Burgos	8	18	9	35
	Rascafría	13	27	15	55
	Valsain	33	108	18	159
TOTAL SECCIÓN 4		101/21,4	280/59,3	91/19,3	472
6 Otras	Álava	28	65	19	112
	Soria-Burgos	49	73	33	155
	Rascafría	26	44	19	89
	Valsain	42	88	21	151
TOTAL SECCIÓN 6		145/28,6	270/53,2	92/18,2	507
8 200×70 mm	Cuenca	15	68	47	130
	TOTAL SECCIÓN 8		15/11,5	68/52,3	47/36,1
9 150×70 mm	Cuenca	15	89	23	127
	TOTAL SECCIÓN 9		15/11,8	89/70,1	23/18,1
TOTAL ESPECIE		371	907	383	1.661

Tabla 2
Clasificación visual según altura y procedencias

Región de procedencia Troza/altura	Clasificación UNE 56544			Total (N/%)
	ME1 (N/%)	ME2 (N/%)	Rechazos (N/%)	
2. Alto Ebro				
A (0-3m)	22/57,9	14/36,8	2/5,3	38/31,9
B (3-6m)	7/22,6	20/64,5	4/12,9	31/26,1
C (6-9m)	0	16/61,5	10/38,5	26/21,8
D (9-12m)	0	11/78,6	3/21,4	14/11,8
E (12-15m)	0	7/77,8	2/22,2	9/7,6
Otras (>15m)	0	0	1/100	1/0,8
TOTAL	29/24	68/57	22/19	119
3. Pirineo Navarro				
Navarra: TOTAL	34/23	75/50	41/27	150
8.Soria-Burgos				
A (0-3m)	38/60,3	20/31,8	5/7,9	63/33,1
B (3-6m)	11/20,7	33/62,3	9/17	53/27,9
C (6-9m)	5/13,6	16/43,2	16/43,2	37/19,5
D (9-12m)	2/7,7	17/65,4	7/26,9	26/13,7
E (12-15m)	1/10	4/40	5/50	10/5,3
Otras (>15m)	0	1/100	0	1/0,5
TOTAL	57/30	91/48	42/22	190
10. Sistema Central				
A (0-3m)	57/48,7	54/46,1	6/5,2	117/25,8
B (3-6m)	29/20	93/64,1	23/15,9	145/31,9
C (6-9m)	19/18,1	68/64,8	18/17,1	105/23,1
D (9-12m)	6/10,5	35/61,4	16/28,1	57/12,6
E (12-15m)	3/11,5	15/57,7	8/30,8	26/5,7
Otras (>15m)	0	2/50	2/50	4/0,9
TOTAL (Rasc+Val):	114/25	267/59	73/16	454
TOTAL Rascafría	39/27	71/49	34/24	144
TOTAL Valsain	75/24	196/63	39/13	310
12. Montes Universales				
Cuenca: TOTAL	137/19	406/54	205/27	748

Tabla 3
VARIABLES clasificadoras según calidades visuales

Región	Zona	VARIABLES					
		Densidad (kg/m ³)		Tensión rotura flexión (N/mm ²)		Módulo Elasticidad (N/mm ²)	
		ρ_m	ρ_k	f_m	f_k	E_I	
2. <i>Alto Ebro</i>	Álava	ME1	570,1	468,5	58,1	32,9	12.894
		ME2	518,8	416,0	36,1	18,1	11.291
		MER	503,3	443,6	31,6	16,4	10.359
3. <i>Pirineo Navarro</i>	Navarra	ME1	564,7	473,9	66,9	33,0	12.761
		ME2	542,1	471,3	46,5	25,6	11.022
		MER	535,1	467,9	32,0	13,6	8.738
8. <i>Soria-Burgos</i>	S.Ibérico	ME1	539,3	435,2	61,8	30,4	12.163
		ME2	520,5	426,3	33,8	18,1	10.078
		MER	504,2	400,0	24,8	12,8	8.644
10. <i>S.ª Guadarrama</i>	S. Central	ME1	520,0	423,2	60,8	30,8	13.598
		ME2	493,3	415,1	44,4	20,2	11.630
		MER	478,9	412,2	27,6	12,4	9.593
12. <i>Mtes.Universales</i>	Cuenca	ME1	499,8	408,8	56,6	27,2	12.413
		ME2	488,3	411,6	38,4	19,3	10.509
		MER	478,5	411,3	28,5	14,4	9.175

El estudio de las relaciones lineales entre variables nos permite conocer la utilidad predictiva de cada una de ellas. En primer lugar, considerando la tensión de rotura como variable dependiente y analizando su ajuste con la densidad para las diferentes regiones, se observa que los coeficientes de determinación no son elevados ($R^2 = 27\%$) y unido a la medición no inmediata de la densidad, lleva a señalar la poca utilidad práctica de esta variable para la predicción de la resistencia de las piezas en la práctica industrial.

Análogamente el análisis para otras variables consideradas buenas predictoras de la tensión de rotura, como el módulo de elasticidad local, proporciona para pino silvestre ajustes con coeficientes de determinación buenos ($R^2 = 50-60\%$) con grados de significación al 99 %, pero los modelos que definen difieren entre las regiones consideradas. De nuevo se suma la dificultad de medida, por lo que su utilidad práctica vuelve a ser escasa.

Bajo estas circunstancias se abren las puertas al uso de variables como los módulos de elasticidad global y global de canto, de fácil determinación y que además proporcionan una predicción de la resistencia elevada.

La utilización de la longitud media y máximo del anillo de crecimiento como variables independientes en las relaciones lineales con el f_m , presentan una gran variación entre muestras y coeficiente de determinación bastante bajos ($R^2 = 1,2-13 \%$), por lo que no parecen indicadores útiles por sí solos.

Parámetros visuales tales como el diámetro del nudo de cara o de canto relativo tampoco son buenos predictores de la resistencia por sí solos, pero mejoran en el caso de considerarlos junto con la densidad.

Otra observación detectada es la estrecha relación que presentan las variables E_t , E_g y E_{gt} ($R^2 = 80-95 \%$). Esto puede ser útil en el caso de adoptar estas variables como sustitutivas del actual módulo de elasticidad local, pudiendo calcular los nuevos valores a partir de los antiguos E_t .

En la Tabla 4, se presentan los valores de las propiedades clasificadoras por regiones de procedencia y para el total de la especie, tanto medios como característicos, obtenidos aplicando los coeficientes correctores (por altura de la sección y por humedad) según la metodología de la norma EN 384, y determinados para las calidades visuales ME1 y ME2 respectivamente.

A partir de los resultados de la Tabla 4 (f_k , E_t y ρ_k) se asignan las clases de resistencia para cada calidad visual según los valores de la norma EN 338 en la misma tabla. En el proceso de asignaciones se ha permanecido del lado de la seguridad debido a que se ha elegido el valor regional menor para cada calidad. De esta forma se evita la circulación de madera en el mercado de calidad inferior a la establecida para la especie.

Se observa que a la primera calidad (ME1) se le asigna una clase resistente C27, lo que supone una disminución de la clase asignada en los estudios anteriores que la clasificaban como C30. Este resultado puede deberse a la inclusión de nuevas regiones de procedencia de la Península Ibérica, lo que hace a la muestra más representativa.

Por último se comparan los datos obtenidos con otros pinos españoles y otras procedencias europeas del pino silvestre. La Tabla 5 muestra los datos obtenidos en la caracterización estructural de otros pinos, resultado de varios estudios realizados en el CIFOR-INIA (López de Roma *et al.*, 1991; Ortiz *et al.*, 1990; Ortiz y Martínez, 1991; Fernández-Golfín *et al.*, 1995; Fernández-Golfín *et al.*, 1998; Fernández-Golfín *et al.*, 1999; Fernández-Golfín y Díez, 1999; Fernández-Golfín *et al.*, 2000).

En ella se exponen los valores de las propiedades clasificadoras y los rendimientos por calidades. Estos últimos deben tomarse con precaución en el pino pinaster por poder estar sobrestimado al considerar sólo dos dimensiones de piezas de ensayo. El resto muestran porcentajes bastante similares por calidades.

Comparando los valores resistentes, la madera de pino silvestre es un 20 % menos resistente y rígida que el pino laricio y un 8 % más que la del pino pinaster. También se observa una similitud entre las propiedades resistentes (E_t y f_m , ρ_k) del pino silvestre y pinaster, aunque ese comportamiento no se cumple en la densidad, la cual presenta un valor superior para el pinaster, probablemente originado por su mayor contenido en resina y en madera de compresión.

Según la Tabla 6 que muestra las asignaciones de las combinaciones especie-calidad para los pinos españoles, la madera más resistente es el pino laricio, seguida por el pino silvestre.

Tabla 4
Asignación de clases de resistencia a las clases de calidad

REGIÓN	CALIDAD VISUAL (UNE 56.544)					
	ME1			ME2		
2. Alto Ebro	f_k	32,9		f_k	18,1	
	E_l	12.894		E_l	11.117	
	ρ_k	468,5	C30	ρ_k	416,0	C18
3. Pirineo Navarro	f_k	33,0		f_k	25,6	
	E_l	12.761		E_l	11.022	
	ρ_k	473,9	C30	ρ_k	471,3	C24
8. Soria-Burgos	f_k	30,4		f_k	18,1	
	E_l	12.163		E_l	10.127	
	ρ_k	435,2	C30	ρ_k	426,3	C18
10. S. ^a Guadarrama	f_k	30,8 *		f_k	20,2 *	
	E_l	13.598		E_l	11.636	
	ρ_k	423,2	C30	ρ_k	415,1	C22
12. Montes Universales	f_k	27,2 *		f_k	19,3 *	
	E_l	12.413		E_l	10.509	
	ρ_k	408,8	C27	ρ_k	411,6	C18
<i>TOTAL</i>	f_k	27,2		f_k	18,1	
	E_l	12.163		E_l	10.127	
	ρ_k	408,8	C27	ρ_k	411,6	C18

* valor regional $< 1,2 \times$ valor muestral menor (norma EN 384).
 Expresado, f_k y E_l en N/mm^2 y ρ_k en kg/m^3 .

Tabla 5
Resumen de resultados de la caracterización estructural **

Especie	Propiedad *	Valor	Clase de calidad		Total
			ME1	ME2	
<i>Pino silvestre</i>	Densidad	ρ_m	522	499	503
		ρ_k	408,8	411,6	417
	Tensión rotura flexión	f_m	59	34	42
		f_k	27,2	18,1	18
	Mod. Elasticid.	E_l	12.163	10.127	10.974
	Rendimiento clasificatorio (%)		22	55	100
<i>Pino radiata</i>	Densidad	ρ_m	519	487	508
		ρ_k	432	411	414
	Tensión rotura flexión	f_m	48,6	37,7	37
		f_k	27	18	17
	Mod. Elasticid.	E_l	12.610	11.080	11.293
	Rendimiento clasificatorio (%)		26	46	100
<i>Pino pinaster</i>	Densidad	ρ_m	557	503	535
		ρ_k	469	424	435
	Tensión rotura flexión	f_m	57	39,4	42
		f_k	30	18	16
	Mod. Elasticid.	E_l	11.462	9.657	10.445
	Rendimiento clasificatorio (%)		34	47	100
<i>Pino laricio</i>	Densidad	ρ_m	614	565	581
		ρ_k	481,1	472	475
	Tensión rotura flexión	f_m	71,5	45,7	53
		f_k	35,1	20,7	20,8
	Mod. Elasticid.	E_l	15.103	11.895	13.291
	Rendimiento clasificatorio (%)		23	51	100

* Densidad expresada en kg/m^3 , Tensión rotura flexión y Mod. Elasticidad en N/mm^2 .

** Valores de las propiedades considerando la población total como única muestra, es decir, no adoptando las especificaciones de cálculo según muestras que estipula EN 384.

Tabla 6
Asignación de las combinaciones especie-calidad a clases de calidad

Especies	Clase de calidad	
	ME1	ME2
<i>Pino radiata</i> *	C24	C18
<i>Pino pinaster</i> *	C24	C18
<i>Pino silvestre</i>	C27	C18
<i>Pino laricio</i>	C35	C20

* Asignaciones aprobadas por CEN TC124 e incluidas en EN 1912.

Tabla 7
Correspondencia entre clases resistentes y calidades para la madera de pino silvestre (en 1912)

NORMA	CLASES RESISTENTES					
	C14	C16	C18	C24	C27	C30
<i>P. Nórdicos</i> INSTA 142	T0 Cara: 1/2 Cto: 1/1 D.fibra: 1/3		T1 Cara: 2/5 y <75 mm Cto: 4/5 D.fibra: 1/5	T2 Cara: 1/4 y <50 mm Cto: 1/2 D.fibra: 1/7		T3 Cara: 1/6 Cto: 1/3 D.fibra: 1/10
<i>Francia</i> NFB 52.001		ST-III Cara: 1/2 y <80 mm Cto: 1/2 y <30 mm D.fibra: 1/6	ST-II Cara: 1/3 y <60 mm Cto: 1/2 y <30 mm D.fibra: 1/6		ST-I Cara: 1/6 y <30 mm Cto: 1/2 y <30 mm D.fibra: 1/14 No existe en EN 1912	
<i>Alemania/Austria</i> DIN 4074		S7 Cara: 1/2 Cto: 1/3 N.agrup: 2/3 D.fibra: 1/5		S10 Cara: 1/3 Cto: 1/3 N.agrup: 1/2 D.fibra: 1/8		S13 Cara: 1/5 Cto: 1/3 N.agrup: 1/3 D.fibra: 1/14
<i>Reino Unido</i> BS 4978		GS KAR		SS KAR		
<i>España</i> UNE 56.544			ME2 Cara: 1/2 y <80 mm Cto: 2/3 D.fibra: 1/6		ME1 Cara: 1/5 y <30 mm Cto: 2/3 y <30 mm D.fibra: 1/10	

Países Nórdicos: Dinamarca, Finlandia, Islandia, Noruega y Suecia.

Para entender los valores de la Tabla 5 y su relación con la Tabla 6, se debe tener en cuenta que la asignación de la clase resistente de la madera de pino radiata fue realizada con anterioridad a la inclusión en la normativa de la clase C27, por ello su asignación aparece como C24, pero se deberá ver con las nuevas modificaciones de la norma de ensayo si pudiese ser corregida. Sin embargo la madera de pino pinaster estaba limitada por el valor del módulo de elasticidad por lo que no cumplía con las exigencias de una clase resistente superior, aunque de la misma manera se deberá considerar la posibilidad de asignación de las nuevas clases resistentes en el futuro.

Ahora bien, haciendo una comparación dentro de la misma especie pero variando esta vez su procedencia (EN 1912, Tabla 7), se observa que el pino silvestre español es superado por la madera de origen nórdico (INSTA 142, calidad T3), francés (NFB 51-001, calidad STI) y alemán (DIN 4074, calidad S13). La norma INSTA 142 y la NFB 50-001 exige un tamaño máximo de nudo de cara de 1/6 mientras que la española UNE 56.544 exige 1/5. Respecto de la procedencia y calidad alemana S13, la norma DIN 4074 exige, al igual que la española, un tamaño máximo de nudo de cara de 1/5 pero la exigencia sobre los nudos de canto es mayor en la alemana ya que el máximo permisible es 1/3 y en la norma española 2/3. Los resultados de la norma británica (BS 4978) no son comparables con los españoles, ya que el proceso clasificatorio aplicado en esta norma se basa en el método KAR (Knot Area Ratio) (Fewell, 1979).

Hay que tener en cuenta que la norma EN 1912 es anterior a la última versión de la norma prEN 338 (1999), en la que se introdujeron las clases C27 y C20 que antes no existían, y por tanto es posible que algunas de las calidades se pudieran adjudicar a estas nuevas.

CONCLUSIONES

Del resultado de la caracterización se obtiene que la clase resistente asignada para la madera de pino silvestre de calidad visual ME1, es C27, y para la calidad ME2, es C18.

Los datos de rendimientos por clasificación visual según la norma UNE 56.544 no aportan, en general, diferencias significativas entre procedencias. Soria-Burgos es la región que produce el mayor porcentaje de maderas de primera calidad.

La región de la Sierra de Guadarrama y Navarra resultan regiones productoras de madera con tendencia significativa a ser más resistente, Álava y de nuevo la Sierra de Guadarrama son propensas a caracterizarse por una rigidez mayor, mientras que las regiones de madera más densa son Navarra y Álava.

La menor obtención de piezas de primera calidad en trozas altas obtenido del análisis de los rendimientos por clasificación visual según la altura de la troza, llevan a aconsejar a la industria una selección previa de trozas por su diámetro mínimo cuando el fin de la producción sea elaborar material resistente.

Como conclusión a la búsqueda de nuevos parámetros o formas de medida que aporten mejores estimaciones de la resistencia de las vigas, se obtiene que las variables como la anchura media y máxima de los anillos crecen de forma inversa a la calidad aunque sólo llegan a explicar el 13 % de la variabilidad del f_m , por lo que su utilidad predictiva es escasa. Sin embargo se confirma el E_1 como un buen predictor de la Tensión de Rotura, pero aún mejores son el E_g y E_{gt} .

La ligera mayor variabilidad observada en los valores del Módulo de Elasticidad Local (E_l) respecto de los Módulos de Elasticidad Global (E_g y E_{gt}) junto a la mejor correlación de estos últimos con la Tensión de Rotura (f_m), hace que se ponga de manifiesto la necesidad de emplear los Módulos Globales en vez del Local en los procesos de caracterización de la madera estructural. Esta conclusión está en concordancia con las últimas tendencias de las normas prEN 408 y EN 384.

Entre los dos tipos anteriores de Módulos de Elasticidad Globales, se aconseja el uso del E_{gt} por la escasa diferencia entre ellos y por ser más fácil su realización sin necesidad de perchas que dificulten el uso de sistemas antivuelcos y el procedimiento del ensayo.

El siguiente paso que incorpora la norma prEN384 para la asignación de la clase resistente, es el cálculo del E_l a partir del E_g mediante una fórmula. Será necesario estudiar en siguientes proyectos si esta aproximación a la clase resistente a través del E_l calculado en vez del obtenido directamente del ensayo, es realmente más apropiada.

La comparación con otras especies españolas, aporta que los rendimientos por calidades del pino silvestre son similares a los del resto de maderas de pino, y en cuanto a valores resistentes se caracteriza por ser el segundo mayor, con tan sólo un 15 % de diferencia respecto al primero, el pino laricio.

SUMMARY

Structural timber of *Pinus sylvestris* L.: mechanical characterization

The results of the mechanical characterization of structural timber of *Pinus sylvestris* L. considering the last standard modifications are given. The former dates are adapted and new samples of different provenances and plank sizes are included. Grading of wood planks are obtained according to UNE 56.544 visual Spanish grading standard and then they are tested to rupture according to the standardized methodology of EN 408, hence the characteristic values of mechanical properties are calculated according to EN 384 standard. Conclusions about assignment of visual grades, efficiency of the variables and parameters used currently to determine the strength quality and a comparison with results of similar Spanish pine studies and *Pinus sylvestris* European provenances are provided.

Key words: *Pinus sylvestris* L., structural timber, timber grading.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AITIM, 1994. Propiedades mecánicas de la madera de pino silvestre de Valsáin. 5 volúmenes. Informe Interno.
- BÖSTROM L., 1999. Determination of the modulus of elasticity in bending of structural timber - comparison of two methods. Swedish National Testing and Research Institute, Holz als Roh-und Werkstoff 57: 145-149.
- BS 4978, 1988. Softwoods grades for structural use. BSI.
- CATALÁN G., GIL P., GALERA R.M., MARTÍN S., AGÚNDEZ, L., ALÍA R., 1991. Las regiones de procedencia de *Pinus sylvestris* L. y *Pinus nigra* Arn. Subsp. *salzmannii* (Dunal) *Franco en España*. ICONA. 29 pp. y planos.
- CEN TC 124, 1999. Timber structures. Strength graded structural timber with rectangular cross section.
- DÍEZ M.R., FERNÁNDEZ-GOLFÍN J.I., VAN DEN EYNDE V., HERMOSO E., 2001. Rendimiento de madera estructural en función del diámetro en punta delgada de las trozas de aserrío. III Congreso Forestal Español de Granada 2001. 6 pp.
- DIN 4074-1, 1989. Clasificación de la madera de coníferas según su capacidad portante. DIN.
- EN 518, 1995. Structural timber. Grading. Requirements for usual strength grading.
- EN 336, 1998. Structural timber. Softwoods and poplar sizes. Permitted deviations.

- EN 338, 1999. Madera estructural. Clases resistentes.
- EN 384, 1999. Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad.
- EN 408, 1999. Madera estructural. Madera estructural y madera laminada. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas.
- EN 1912, 1999. Madera estructural. Clases resistentes. Asignación de especies y calidades visuales.
- EN 14081, 2000. Timber structures. Strength graded structural timber with rectangular cross section. Part 2: Machine Grading-Additional requirements for initial type testing. Part 3: Machine Grading-Additional requirements for factory production control.
- FERNÁNDEZ-GOLFÍN J.I., DíEZ M.R., 1999. Coníferas españolas de uso estructural. Propiedades de la madera aserrada. AITIM n.º 200. 72-75.
- 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. Invest. Agr.: Sist. Recur. For. 6 (1 y 2). 183-215.
- FERNÁNDEZ-GOLFÍN J.I., DíEZ M.R., GUTIÉRREZ A., 1998. Caracterización mecánica de la madera aserrada de uso estructural, clasificada visualmente de acuerdo con la norma UNE 56.544. Materiales de construcción. Vol.48. n.º 252: 45-59.
- FERNÁNDEZ-GOLFÍN J.I., DíEZ M.R., HERMOSO E., 1999. Propiedades de la madera de pino Laricio de Cuenca. Ayuntamiento de Cuenca. 30-38.
- FERNÁNDEZ-GOLFÍN J.I., GUTIÉRREZ A., BAONZA M.V., DíEZ M.R., 1995. Características físico-mecánicas de las maderas de especies de crecimiento rápido de procedencia española. Revista de Investigación Agraria 4(2).179-188.
- FERNÁNDEZ-GOLFÍN J.I., GUTIÉRREZ A., BAONZA M.V., DíEZ M.R., ALVÁREZ H., RODRÍGUEZ E., TROYA M.T., CONDE M., HERMOSO E., 2000. Caracterización de la madera de *Pinus nigra* subsp. *salzmannii*. Informe final del proyecto SC96-045-C.2. 113 pp.
- FEWELL A.R., 1979 (b). Stress graded timber for structural use. Stress grading information. Princess Risborough Laboratory. 3-4.
- INSTA 142, 1994. Nordic visual stress grading rules from timber.
- LÓPEZ DE ROMA A. *et al.*, 1991. Propiedades y Tecnología de la madera de pino radiata del País Vasco. Monografías INIA n.º 80. ISBN 84-7498-387-8. MAPA. 241 pp.
- NFB 52-001-5, 1992. Règles d'utilisation du bois dans les constructions. Caractéristiques mécaniques conventionnelles associées au classement visuel des principales essences résineuses et feuillues utilisées en structures. AFNOR.
- ORTIZ J., CRUZ H., BLANCHÓN J.L., 1990. Informe final del proyecto MA1B-0129: Standard Quality of *Pinus pinaster*. (Informe Interno.)
- ORTIZ J., MARTÍNEZ J.J., 1991. Características mecánicas de la madera de pino gallego, obtenidas a partir de ensayos con piezas de tamaño estructural. AITIM 150. 95-101.
- UNE 56.544, 1999. Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural.