

Madera aserrada de gran escuadría para uso estructural y sus particularidades

Large cross section sawn timber for structural use and its singularities

Francisco Arriaga Martitegui*, Guillermo Íñiguez González**, Miguel Esteban Herrero***, Ignacio Bobadilla Maldonado***

RESUMEN

En este artículo se realiza una exposición general del efecto del tamaño en las propiedades mecánicas de la madera y la evolución que han sufrido los procedimientos de ensayo y clasificación por esta razón. Además se expone un trabajo de investigación específico sobre madera de gran escuadría. Sobre un total de 395 piezas de madera aserrada de tres especies (*Pinus sylvestris* L., *Pinus nigra* subs. *salzmannii* (Dunal) Franco y *Pinus radiata* D. Don) con secciones comprendidas entre 150x200 y 200x250 mm, se ha procedido a su clasificación de acuerdo con la norma UNE 56544:2003 determinando su rendimiento y propiedades mecánicas. El porcentaje de piezas que son rechazadas es demasiado elevado (38 a 45%) y por tanto se propone una modificación de las especificaciones de la norma. Con la nueva propuesta de norma el rendimiento aumenta en alto grado (rechazo del 11 al 17%) sin que las propiedades mecánicas se vean afectadas significativamente.

Por otro lado se ha seguido un procedimiento similar con 85 piezas de madera procedentes de estructuras antiguas en proceso de derribo de *Pinus sylvestris* L. y *Pinus pinaster* Ait. La clasificación de acuerdo con la norma UNE 56544:2003 da lugar a un 52% de rechazo aplicando estrictamente todos los parámetros de clasificación. Este procedimiento resulta poco viable en la práctica en el caso de estructuras existentes y por tanto, se propone la aplicación de una clasificación basada únicamente en los parámetros del tamaño de los nudos y de la desviación de la fibra. De esta forma el rendimiento aumenta reduciendo el porcentaje de rechazo al 10%.

850-4

Palabras clave: gruesa escuadría, madera estructural, clasificación visual, propiedades mecánicas, efecto de tamaño.

SUMMARY

*The size effect on mechanical properties of timber is described including the recent evolution of testing procedures and stress grading. Further, a specific research work on large cross section timber is explained. A total of 395 pieces of sawn timber from three species (*Pinus sylvestris* L., *Pinus nigra* subs. *salzmannii* (Dunal) Franco and *Pinus radiata* D. Don) with cross section between 150x200 y 200x250 mm, have been visually graded according to UNE 56544 standard obtaining its output and mechanical properties. The percentage of rejected pieces is too high (38 to 45%) and therefore, a modification of standard specifications is proposed. The output is highly improved in the proposal of standard (rejected percentage of 11 to 17%) whereas the mechanical properties are not modified in practice.*

*A similar procedure was applied to 85 timber pieces from old timber structures of building demolition of *Pinus sylvestris* L. y *Pinus pinaster* Ait. The percentage of rejected pieces is 52% in a visual grading according to the application of all grading parameters of the standard UNE 56544:2003. This procedure is not practical for existing structures and therefore, it is proposed the application of grading considering only the parameters of knots size and slope of grain. In that way the output is improved reducing the rejected percentage to 10%.*

Keywords: large cross section, structural timber, visual grading, mechanical properties, size effect.

Universidad Politécnica de Madrid (UPM)

* Dr. Arquitecto

**Ingeniero de Montes

***Dr. Ingeniero de Montes

Persona de contacto/Corresponding author: francisco.arriaga@upm.es (Francisco Arriaga Martitegui)

Fecha de recepción: 25-II-07

Fecha de aceptación: 28-III-07

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Probetas pequeñas frente a tamaño estructural

La madera es un material heterogéneo debido a su estructura fibrosa y a la presencia de irregularidades en su estructura; la más evidente es la presencia de nudos que son consecuencia de la existencia de ramas en el árbol. Un nudo supone una discontinuidad en el material y una desviación local de las fibras muy importante. Las propiedades mecánicas de la pieza de madera con nudos quedan reducidas notablemente.

Es fácil entender que para el estudio de las propiedades mecánicas de la madera se pueden plantear dos alternativas. Una consiste en el estudio del material libre de defectos (nudos, desviación de la fibra y otros). Lógicamente este material tiene que ser de reducidas dimensiones para evitar la presencia de los defectos o singularidades; este formato se denomina probetas pequeñas y libres de defectos. En las normas de los países europeos, como por ejemplo la UNE 56537:1979 (1), por lo general la sección transversal es de 20x20 mm (50x50 mm en la norma ASTM D143-94:2000 (2)) y la longitud no mayor que 300 mm (750 mm en la norma ASTM D143-94:2000).

La otra alternativa es el estudio del material con los defectos que se encuentran en las piezas comercializadas en tamaño grande. Su tamaño es prácticamente el mismo que se emplea en su aplicación estructural. La denominación de este formato es el tamaño estructural o tamaño comercial. Evidentemente, sus propiedades mecánicas son mucho más reducidas que las obtenidas en probetas pequeñas y libres de defectos.

El procedimiento de obtención de las propiedades mecánicas de la madera hasta la década de los 70 del siglo pasado se basaba en el ensayo de probetas pequeñas y libres de defectos. Los métodos de cálculo de estructuras de madera seguían el formato de las tensiones admisibles del material. Esta tensión admisible o resistencia se obtenía a partir de un percentil (normalmente el 5%) de la distribución normal de la resistencia al que se aplicaban una serie de ajustes por duración de la carga, humedad, altura de la sección, calidad y coeficiente de seguridad global.

A partir de los años 70 este procedimiento se pone en cuestión como sistema válido para predecir el comportamiento de la madera en tamaño estructural y con defectos de las calidades comerciales. Madsen, del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de British Columbia llevó a cabo un estudio experimental con el objetivo de comprobar su validez (3). Sus resultados dejaban claro que el procedimiento desarrollado hasta entonces se alejaba, en muchos casos, de la realidad y era necesario un cambio de planteamiento. La suposición de que la distribución estadística era normal daba lugar a resultados demasiado conservadores y en muchos casos otras distribuciones no simétricas eran mucho más precisas.

En la figura 1 se muestra el diferente planteamiento que tiene la obtención de probetas pequeñas y libres de defectos frente a la madera aserrada estructural que arranca desde la misma extracción del fuste del árbol. Las probetas se extraen con la fibra recta y libres de defectos de rebanadas obtenidas a varios niveles de altura en el fuste y, generalmente, con diferentes orientaciones con el fin de estudiar su influencia en las propiedades físicas y mecánicas. Su objetivo se centra más en el estudio científico de la madera que produce el árbol.

Sin embargo, en la figura de la derecha se observa cómo la madera aserrada estructural, que ya contiene los defectos y singularidades del árbol da lugar a varias piezas en cada troza. Si la pieza es de gran escuadría, normalmente es enteriza (contiene el corazón) y se obtiene una pieza por troza.

La relación entre resistencia y duración de la carga expresada en la denominada "Curva de Madison" deducida por Wood en 1951 (4), figura 2, resultaba ser conservadora, en el caso de madera estructural, para cargas de duración menor a 1 año y contra la seguridad para cargas de mayor duración. En la misma figura se incluye la curva adoptada por el Eurocódigo 5 (5), que es la recogida en el Documento Básico de Seguridad Estructural de Estructuras de Madera del CTE (6), donde se aprecian las diferencias entre ambos planteamientos.

Por otro lado, la influencia de la humedad en la resistencia es apreciable para percentiles superiores al 40%, pero por debajo su efecto disminuye. Para el 5º percentil su influencia es despreciable por debajo del 20% de contenido de humedad.

En el sistema de probetas pequeñas y libres de defectos el efecto de la calidad de la madera se introducía mediante unos factores de corrección de la resistencia en función de la calidad de la pieza comercial. Esta corrección era la misma para casi todas las especies, lo que supone una simplificación que se aleja de la realidad.

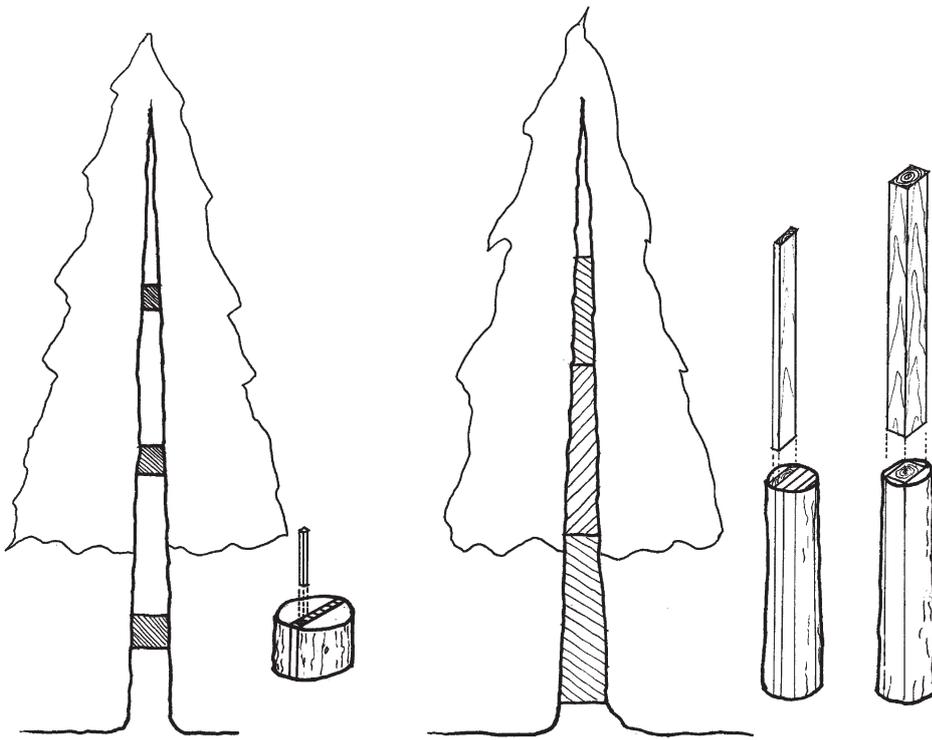


Figura 1. Extracción de probetas de ensayo: pequeñas y libres de defectos, madera aserrada estructural y madera entera.

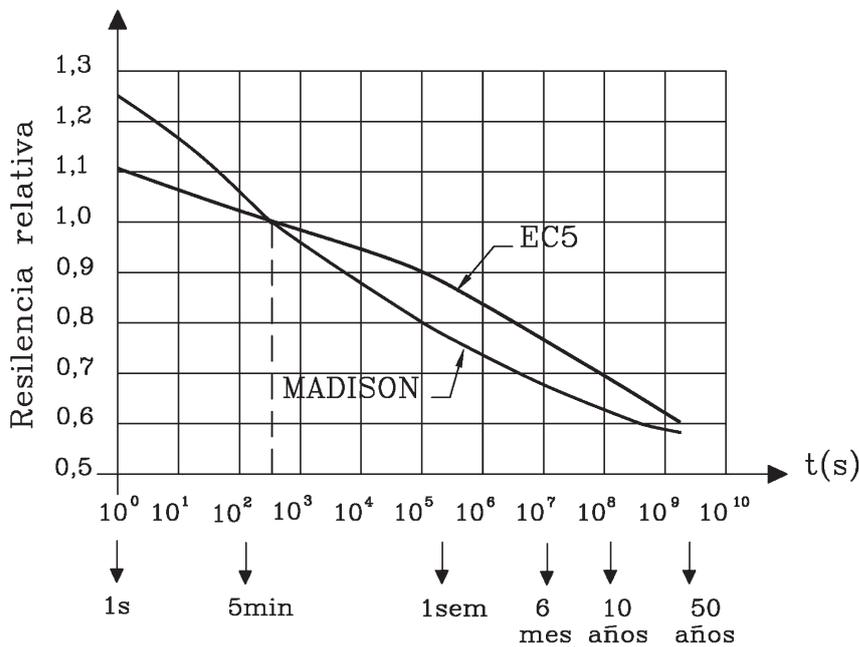


Figura 2. Relación entre resistencia y duración de la carga. Curva de Madison y curva adoptada en el Eurocódigo 5.

Varios trabajos experimentales concluyeron que no era válido este procedimiento (3).

En la actualidad la caracterización de la madera estructural se realiza mediante ensayos en probetas con tamaño estructural y con la calidad comercial correspondiente. En Europa, los ensayos para la determinación de las propiedades mecánicas se realizan de acuerdo con la norma UNE-EN 408:2004 (7), el procedimiento de estima-

ción de los valores característicos de acuerdo con la norma EN 384 (8) y la clasificación visual de acuerdo con la norma marco UNE-EN 14081-1:2006 (9). Los valores característicos de las propiedades mecánicas que se obtienen para cada calidad quedan asignados en un sistema de clases resistentes definido en la norma UNE-EN 338:2003 (10) con el fin de simplificar el manejo de la gran diversidad que supondría considerar las combinaciones de especie, procedencia y calidad.

1.2. Clasificación visual de la madera y piezas de gran escuadría

La calidad de la madera desde el punto de vista resistente se evalúa visualmente en función de la cantidad y tamaño de las singularidades presentes en las piezas (nudos, fendas, desviación de la fibra, etc.).

Esta evaluación se efectúa mediante una inspección visual de acuerdo con la norma de clasificación correspondiente.

Muchas de las normas de clasificación que se emplean en la actualidad están orientadas a piezas con tamaño de la sección relativamente pequeño (gruesos de 35 a 100 mm y anchura de la sección de 100 a 200 mm). La asignación de la clase resistente se realiza a partir de los valores de resistencia obtenidos por ensayo para cada calidad y queda recogida en la norma UNE-EN 1912:2005 (11).

Entre las normas actuales para la clasificación visual de la madera, dentro del ámbito de la Unión Europea para madera de coníferas, se encuentran las siguientes: la alemana DIN 4074-1:2003 (12), la británica BS 4978:1996 (13), la francesa NF B 52001:1998 (14), la nórdica INSTA 142:1997 (15) y la española UNE 56544:2003 (16).

Del análisis previo de estos procedimientos de clasificación se puede deducir que las líneas propuestas por la norma DIN 4074-1:2003 para la clasificación visual de la madera son las que permiten una evaluación más ajustada a las características de la madera de gran escuadría, ya que esta norma establece especificaciones distintas según las escuadrías de las piezas.

Así, la norma DIN 4074-1:2003 diferencia cuatro tipos de escuadrías con especificaciones distintas en cada caso:

Listones: piezas con grueso menor que 40 mm y anchura menor que 80 mm.

Tablas: piezas con grueso menor o igual a 40 mm y anchura mayor o igual a 80 mm.

Tablones: piezas con grueso mayor que 40 mm y anchura mayor que 3 veces el grueso.

Madera escuadrada: piezas con grueso, b , mayor que 40 mm y anchura, h , que cumpla la siguiente relación: $b \leq h < 3 \cdot b$.

La gruesa escuadría queda recogida, en esta norma, en lo que se denomina madera escuadrada. Son piezas con una sección transversal de poca esbeltez.

La norma de los países nórdicos, INSTA 142:1997, también establece dos categorías

según el tamaño de la sección de la pieza de madera aserrada, además de un tercer grupo para las tablas destinadas a láminas para la fabricación de madera laminada encolada. Cada grupo tiene diferentes especificaciones para la limitación de los defectos. Los dos grupos para madera aserrada son los siguientes:

Pequeña escuadría: piezas con grueso menor que 45 mm y con anchura menor que 70 mm (hasta un mínimo de 25x50 mm).

Gran escuadría: piezas con un grueso mayor o igual que 45 mm o con una anchura mayor o igual a 70 mm.

En el caso de la normativa española, la norma UNE 56544:2003 de clasificación visual de la madera aserrada con destino estructural es aplicable a la madera de los pinos radiata, pinaster, silvestre y laricio de dimensiones inferiores a 200x70 mm de sección. La caracterización de estas maderas ha sido objeto de varios estudios y publicaciones realizadas por el Laboratorio de Estructuras de Madera del Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias (17-21).

Desde hace unos pocos años, algunos aserraderos españoles han comenzado a utilizar la norma de clasificación UNE 56544:2003 interesados en el mercado creciente de la madera para estructuras y obligados, en cierto grado, por las mayores exigencias en el control del proyecto y la ejecución de las obras. Normalmente, se acogían al control externo de organismos de certificación para la obtención de un Sello o Marca de Calidad, como es el caso del Sello de Calidad AITIM para Madera Aserrada Estructural.

Sin embargo, la mayor parte de la madera que comercializan los aserraderos para uso estructural tiene unas dimensiones de la sección transversal muy superiores a los 70x200 mm referidos en la norma. Habitualmente, se trata de piezas con secciones que parten de 100x150 hasta 200x250 mm. En estos casos, la asignación de la clase resistente a estas piezas de gruesa escuadría, debía ser necesariamente conservadora, a la espera de realizar la oportuna experimentación.

Otra de las razones que evidencian la necesidad de estudiar la madera de gran escuadría viene como consecuencia de la intervención en la restauración o simplemente el mantenimiento y refuerzo de estructuras de madera en edificaciones antiguas. Las estructuras de madera de edificios con más de un siglo de antigüedad están constituidas por piezas con gruesa escuadría. La

necesidad de una peritación estructural se encuentra con el inconveniente de una incertidumbre elevada en la aplicación de la normativa de clasificación actual. Si se aplican los criterios de las normas actuales de clasificación, pensadas para pequeñas escuadrías el porcentaje de piezas rechazadas es excesivo.

Este inconveniente detectado en la aplicación de las normas de clasificación actuales a la madera de gran escuadría ha sido estudiado en Francia (país que ha tenido una evolución similar al nuestro en lo relativo a la norma de clasificación), deduciendo la necesidad de modificar las especificaciones de la norma para su empleo en grandes escuadrías (22).

1.3. Particularidades de las piezas de gran escuadría

La madera de gran escuadría presenta ciertas particularidades respecto a la madera de pequeña escuadría. En primer lugar presenta una mayor relevancia de las fendas y de las gemas. El secado de gruesas secciones es más delicado, y en todo caso es inevitable la aparición de las fendas de secado. Las gemas también están presentes con mayor incidencia que en la pequeña escuadría y sobre todo en piezas de madera de estructuras existentes.

Si se aplican los criterios recogidos en muchas normas de clasificación es muy probable que la mayoría de las piezas quedaran rechazadas por estos defectos, sin que se corresponda con una disminución significativa de las propiedades mecánicas.

Por otro lado, la médula y la madera juvenil casi siempre están presentes en la gruesa escuadría, ya que suelen ser secciones enterizas (que contienen el corazón de la pieza). En algunas normas de clasificación las calidades altas no permiten la presencia de médula en la pieza. Esto es justificable si la sección transversal es reducida, pero no en una sección de grandes dimensiones donde la relevancia de la médula queda muy atenuada.

También es posible encontrar defectos internos que no quedan a la vista. Por ejemplo, nudos que no se manifiestan en la superficie de la pieza, debido a una poda previa. Por otro lado, el contenido de humedad de la madera de gran escuadría en su puesta en obra, suele ser más elevado que el que se presenta en las piezas de pequeña sección. Esto da lugar a un proceso de secado posterior que hace que se manifiesten las fendas de secado una vez colocadas las

piezas, así como mermas y posibles movimientos y deformaciones.

En la figura 3 se muestran las diferencias que existen en los diferentes formatos de las piezas de madera. Las probetas de dimensiones pequeñas (20x20 mm) están libres de defectos y tienen la fibra recta. La madera aserrada estructural con escuadrías "pequeñas" comerciales (50x150 a 70x200 mm, aproximadamente) contienen los defectos y singularidades correspondientes a la calidad de la madera correspondiente. La madera de "gran" escuadría (del orden de 150x200 mm) presenta una relevancia mucho mayor de las fendas de secado y suelen ser enterizas. Finalmente, la madera de gran escuadría y procedente de estructuras antiguas con frecuencia contiene grandes gemas en sus aristas.

Además de los métodos de clasificación visual existe otra metodología denominada clasificación mecánica. Este procedimiento consiste en someter a las piezas de madera a un ensayo mecánico no destructivo, aplicando una fuerza y registrando la deformación correspondiente. Esta medición se realiza a lo largo de prácticamente toda la longitud de la pieza y se determina el valor más bajo del módulo de elasticidad. En función de éste se asigna la resistencia, gracias a la correlación que existe entre ambos parámetros. Es un método rápido y más fiable que la clasificación visual al no estar sujeto a la subjetividad en la medición de los defectos. En Europa este procedimiento queda regulado por las partes 2 y 3 de la norma UNE-EN 14081 (23 y 24). Sin embargo, en la actualidad en Europa la clasificación automática está abandonando estos procedimientos mecánicos por otros basados en otras técnicas no destructivas como el análisis dinámico de vibraciones, por ejemplo.

En relación a la gran escuadría la clasificación mecánica no permite resolver el problema ya que las máquinas de clasificación

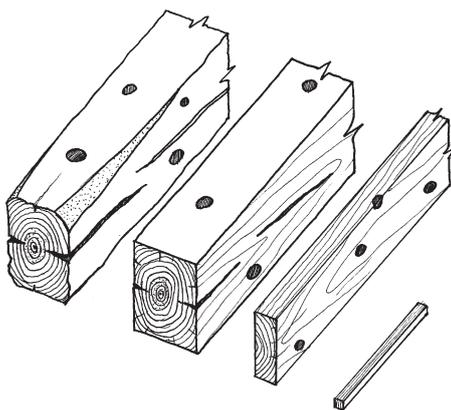


Figura 3. Diferentes formatos de la madera. De derecha a izquierda: probetas pequeñas y libres de defectos, madera aserrada de "pequeña" y "gran" escuadría y madera procedente de estructuras antiguas.

están limitadas a piezas con un grueso no superior a 70 o 100 mm. Por tanto, este procedimiento no es aplicable a este caso.

Si se trata de piezas de madera de gran esquadría de estructuras existentes (en edificios antiguos) el problema se ve agudizado ya que estas piezas suelen tener una alta variabilidad de la forma y dimensiones de la sección transversal. Además, normalmente no es posible acceder a todas las caras de las piezas al quedar ocultas por la obra y muchas veces la superficie aparece pintada o con suciedad que dificulta su observación. Esto hace mucho más compleja la aplicación de la normativa de clasificación. Además, en muchos casos existen daños provocados por organismos xilófagos que han dejado zonas débiles por pudrición o por el efecto de las galerías producidas por las larvas.

En este campo de la estimación de las propiedades mecánicas de la madera puesta en obra las técnicas no destructivas (ultrasonidos, métodos de vibración, etc.) tienen un campo de aplicación creciente que permite resolver, al menos en gran parte, el problema.

1.4. Efecto del tamaño

La resistencia de la madera depende del tamaño de la pieza. Esta particularidad del material supone otra complicación añadida en el proceso de caracterización y de cálculo, si se compara con otros materiales. El efecto de tamaño ha sido estudiado y sobre todo experimentado en la madera desde la segunda década del siglo pasado.

Los primeros estudios sobre el efecto del tamaño en la resistencia de la madera fueron realizados por Newlin y Trayer en 1924 (25).

Analizaron la relación entre la resistencia a flexión de vigas de madera con la altura de la sección. Estudiaron el fenómeno hasta una altura de 300 mm (12 pulgadas) tomando como referencia una altura de 50 mm (2 pulgadas). En 1947 Dawley y Youngquist continuaron esos trabajos analizando la relación en vigas con altura de la sección de hasta 400 mm (16 pulgadas).

Estas experiencias fueron publicadas por Freas y Selbo en 1954 (26) y sus conclusiones fueron recogidas en la normativa de cálculo de los Estados Unidos de América como factor de altura para el ajuste de la resistencia a flexión.

Hasta ese momento los trabajos sobre el efecto del tamaño de la pieza se basaban en

el estudio de la influencia del canto de la pieza (o altura de la sección). Sin embargo, en 1939 Weibull (27) había propuesto una teoría con carácter más amplio sobre el efecto del tamaño basada en la concepción estadística de la resistencia. Las bases de esta teoría se fundan en el hecho de que existe una mayor probabilidad de que haya una zona de baja resistencia en una pieza de gran volumen frente a una pieza de pequeño volumen.

Su generalidad se asienta en que la relación se establece entre resistencia y volumen, en lugar de entre resistencia y altura de la sección. Se denomina teoría del eslabón más débil. Supone que el fallo de la pieza se produce cuando la tensión alcanza el mismo valor que la tensión que produciría el fallo del elemento más débil contenido en su volumen si se ensayara independientemente. Esta hipótesis se cumple en materiales con un comportamiento frágil. En los materiales de comportamiento dúctil su validez es menor, ya que cuando una parte de la pieza alcanza la tensión máxima es posible una redistribución de las tensiones alcanzando cargas de rotura mayores.

Esta teoría del eslabón más débil fue aplicada por primera vez a la madera por Bohannan en 1966 estudiando la influencia del tamaño en la resistencia a flexión (28). Sin embargo, en su trabajo encontró un ajuste mejor con los datos experimentales si en lugar de utilizar el volumen de la pieza empleaba, simplemente, la longitud de la pieza y la altura de la sección.

En 1974 Barrett comprobó el efecto del tamaño en la resistencia a tracción perpendicular a la fibra en madera de Pino Oregón (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) (29) y en 1976 Mau constató un efecto más acentuado en la madera laminada encolada (30). La resistencia a cortante también mostraba cierta dependencia del tamaño como observaron Foschi y Barrett en 1975 (31).

En las piezas sometidas a tracción el esfuerzo axial suele ser constante a lo largo de la longitud de la pieza. Por tanto, cualquier sección se encuentra sometida a la misma tensión y el fallo se producirá en la sección más débil. Es fácil entender que cuanto mayor sea la longitud de la pieza mayor será la probabilidad de encontrar el defecto pésimo de la calidad de la madera, y por tanto el valor característico de la resistencia será menor. La sección más débil lo será por la existencia de nudos, que suponen una discontinuidad de las fibras y por tanto un aumento de la tensión, o bien por la des-

viación de la fibra que conduce también a una disminución de la resistencia (32).

En las piezas sometidas a flexión la situación es algo más compleja. Si sobre un conjunto de piezas de madera de la misma calidad estructural se realizan ensayos de rotura a flexión dividiendo la muestra en dos lotes, uno con luz mayor que el otro, se obtiene un valor característico de la resistencia mayor en las piezas más cortas.

Normalmente, la ley de momentos flectores es variable a lo largo de la longitud y los valores máximos se alcanzan en unas zonas determinadas. Además, la distribución de las tensiones debidas a la flexión da lugar a una ley triangular en la que los valores máximos se alcanzan en las fibras extremas de la sección. Por tanto, la probabilidad de que los defectos más graves queden situados en la zona de mayor tensión es más baja cuanto más pequeña sea la pieza. En este caso, la resistencia obtenida depende de la disposición de las cargas, además del tamaño.

En el caso de las piezas sometidas a compresión la situación es parecida al caso de la tracción, pero con algunas particularidades. El fallo por compresión, sin posibilidad de pandeo, presenta un comportamiento mucho más dúctil que el fallo por tracción, de comportamiento frágil. Por tanto, una sección sometida a una tensión de compresión elevada a causa de los defectos existentes, puede admitir más carga al plastificarse parcialmente la sección. Por esta razón, el efecto del tamaño es menos marcado en la compresión.

Si se ensayan a rotura grupos de piezas de diferentes tamaños (S_1 y S_2) se obtienen valores característicos de las resistencias diferentes (f_1 y f_2) respectivamente. La diferencia del tamaño puede deberse a la altura de la sección (h), la longitud de la pieza (l) o su volumen (V). La relación que existe entre el tamaño y la resistencia puede expresarse como una relación lineal de sus logaritmos, figura 4.

Se define como parámetro del efecto del tamaño a la pendiente de esa relación lineal, g ,

$$g = \frac{\log f_1 - \log f_2}{\log S_2 - \log S_1}$$

La relación, k , entre las resistencias para cada tamaño, es por tanto:

$$k = \frac{f_1}{f_2} = \left(\frac{S_2}{S_1} \right)^g$$

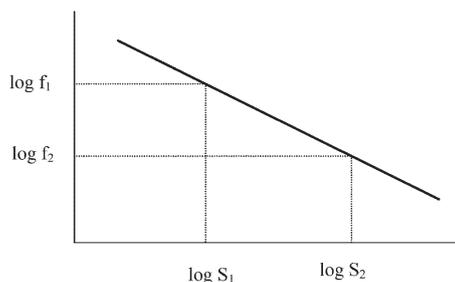


Figura 4. Relación entre resistencia y tamaño.

Madsen (3, 33) y Barrett (34, 35) resumen los resultados obtenidos en numerosos trabajos de investigación respecto al parámetro del efecto de tamaño y proponen los siguientes valores para cada propiedad:

En la resistencia a la flexión el efecto de la longitud da lugar a un valor de $g = 0,17$ a $0,20$. Para la altura de la sección no parece detectarse este efecto. No obstante, la relación entre luz y altura de la sección es prácticamente constante en las piezas estructurales en flexión, con lo que el parámetro puede considerarse el mismo para ambas dimensiones.

El efecto de la anchura no se aprecia en la madera libre de defectos, pero en el caso de la madera comercial con defectos, el fenómeno es contrario a la longitud, de manera que a mayor anchura la resistencia aumenta. El parámetro se estima como $g = -0,23$.

En la resistencia a la tracción paralela a la fibra el efecto de la longitud es aproximadamente $g = 0,18$, con lo que es aceptable unificarlo con el $0,20$ de la flexión. Para la altura, se sugiere un factor de $0,10$.

Finalmente, en la resistencia a la compresión el efecto de la longitud es de $g = 0,10$ y no hay efecto de la altura ni de la anchura.

En la práctica del cálculo según el Eurocódigo 5 o el DB de Seguridad Estructural de Estructuras de Madera del CTE, sólo se considera el efecto del tamaño en las resistencias a flexión y a tracción paralela a la fibra con un parámetro dependiente de la altura de la sección, $g = 0,20$ (para la madera maciza).

No se considera el efecto de la anchura o grueso de la pieza, ni tampoco se considera efecto del tamaño en la resistencia a la compresión paralela ni en la resistencia a cortante.

Por otro lado, en la resistencia a la tracción perpendicular a la fibra se considera el efecto del volumen de la pieza en el caso de la madera laminada encolada, con un parámetro $g = 0,20$.

En las especies españolas el efecto del tamaño ha sido estudiado para el pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.) por Hermoso (36) obteniendo para la resistencia a la flexión unos resultados coincidentes con el resto de trabajos de investigación comentados. El parámetro del efecto de la altura (con esbeltez constante longitud/altura) obtenido es del orden de 0,20. El efecto de la anchura o grueso de la pieza no resulta significativo en la calidad más alta y del orden de -0,20 en la calidad inferior. Otros trabajos en la misma línea, Fernández-Golfín (37) incorporaron a estos estudios del tamaño de la pieza, la especie de pino laricio (*Pinus nigra* subs. *salzmannii* (Dunal) Franco)). El parámetro del efecto de la altura en esta especie resultó muy superior al del pino silvestre, alcanzando un valor de $g = 0,51$.

2. INVESTIGACIÓN EN LA CARACTERIZACIÓN DE LA GRAN ESCUADRÍA

Con el fin de estudiar las propiedades mecánicas en la madera de gran escuadría de procedencia española se inició en 2003 un proyecto de investigación financiado por el Plan Nacional I+D+I (Proyecto AGL2002-00813) con un equipo constituido por investigadores de la Unidad Docente de Cálculo de Estructuras de la ETS de Ingenieros de Montes de la Universidad Politécnica de Madrid, el Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias, AITIM y la Universidad de Valladolid. El proyecto se titulaba "Clasificación y evaluación no destructiva de la calidad de la madera de gruesa escuadría para uso estructural" y tenía una duración de tres años.

2.1. Objetivos

El objetivo principal de esta investigación es conocer cuáles son las particularidades de la gran escuadría para poder decidir si es necesario o no diferenciarlas a la hora de su evaluación. En este proyecto se pretende, por un lado, determinar si los valores de resistencia encontrados para dimensiones menores (hasta 200x70 mm) son aplicables a la madera de grandes escuadrías y, por otro, aportar pautas y medios para afrontar con mayor fundamento la peritación de estas estructuras cuando se encuentran en obra "antigua".

Al mismo tiempo, se evalúa la posibilidad de emplear otros tipos de métodos no destructivos (ultrasonidos, análisis de vibraciones, métodos de penetración y resistencia al arranque de tornillo) como herramientas de apoyo en la determinación de la capacidad portante de una estructura. Esta parte del proyecto no está incluida en el alcance de este artículo.

Por lo tanto, el trabajo se divide en dos partes principales:

Realización de un detallado estudio en piezas estructurales de madera de gran escuadría procedentes de estructuras antiguas (Pino silvestre y Pino pinaster), de forma que se pueda correlacionar el resultado de la inspección visual con el de los ensayos mecánicos efectuados. Con el resultado se evalúa la fiabilidad de la norma de clasificación y se propondrán nuevos criterios o matices para dicha clasificación (para hacerla aplicable a la madera antigua).

Evaluación resistente del material estructural de gran escuadría de los pinos radiata (*Pinus radiata* D. Don), silvestre (*Pinus sylvestris* L.) y laricio (*Pinus nigra* subs. *salzmannii* (Dunal) Franco) de procedencia española, los únicos que suelen aportar grandes escuadrías, proponiendo modificaciones en la norma UNE 56544:2003 (aplicable a maderas de reducidas escuadrías) para conseguir su correcta clasificación visual.

2.2. Metodología

La metodología tiene dos variantes, la primera establecida para la madera procedente de estructuras existentes, y la segunda para la madera procedente de aserraderos. Cada una se adapta a las particularidades del material, aunque la filosofía es básicamente la misma.

2.2.1. Madera procedente de estructuras existentes

El material de estudio ha consistido en 85 piezas de madera de gruesa escuadría de las especies de pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.) y pino pinaster (*Pinus pinaster* Ait.). Procedían de varios edificios antiguos en proceso de derribo parcial. Se ha realizado un registro de todas las características de las piezas, mediante una metodología exhaustiva para no perder la información una vez destruida la pieza en el ensayo (38).

La clasificación de las piezas se ha realizado de acuerdo con la norma española UNE 56544:2003. Se han ensayado a flexión para la determinación de las propiedades mecánicas de resistencia y módulo de elasticidad y se ha determinado la densidad según la norma UNE-EN 408:2004.

2.2.2. Madera procedente de aserraderos

El material estudiado ha consistido en tres muestras de piezas de madera de tres especies diferentes: pino radiata (155 piezas), pino silvestre (120) y pino laricio (120). Cada grupo se dividía en dos muestras

Tabla 1. Resultados de la clasificación visual. Rendimiento (%)

Criterio	UNE 56544		
	ME-1	ME-2	Rechazo
Completo	9	39	52
Parcial	17	73	10

Tabla 2. Propiedades mecánicas para las calidades visuales ($f_{m,50}$: valor medio de la resistencia a flexión; $f_{m,k}$: valor característico correspondiente al 5º percentil de la resistencia a flexión; $E_{0,mean}$: valor medio del módulo de elasticidad)

UNE 56544 criterio parcial (*)			
Calidad	$f_{m,50}$ (N/mm ²)	$f_{m,k}$ (N/mm ²)	$E_{0,mean}$ (N/mm ²)
ME1 (*)	30,7	16,8	9.058
ME2 (*)	26,2	13,4	9.166
ME1+ME2 (*)	27,1	13,8	9.145
Rechazo	20,7	10,3	7.018

(*) Debe observarse que la clasificación se ha realizado únicamente con los parámetros del tamaño de nudos y de la desviación de la fibra, por lo que estrictamente no es la aplicación de la norma UNE 56544:2003.

con diferente escuadría: 150x200 mm y 200x250 mm (excepto en el pino radiata cuyas escuadrías eran 150x200 y 150x250 mm). Sobre este material se ha realizado la clasificación visual de acuerdo con la norma UNE 56544:2003. Finalmente se ha determinado la densidad y la resistencia y módulo de elasticidad a flexión mediante los ensayos mecánicos según la norma UNE-EN 408:2004.

3. RESULTADOS

3.1. Madera procedente de estructuras existentes

La utilización de la norma UNE 56544:2003 conduce a un porcentaje de piezas rechazadas muy elevado (52%). La causa principal del rechazo se encuentra en el defecto de las gemas. En realidad no es un defecto que pueda reducir la resistencia del material, sino que es simplemente una pérdida de sección transversal. La experimentación con piezas de madera antigua con gemas no ha demostrado una influencia significativa de las gemas en la resistencia (38). Las fendas constituyen también otro defecto

con un alto porcentaje de rechazo, pero en las gruesas escuadrías son inevitables. Además, el efecto de las fendas en la resistencia y rigidez es bajo y la tendencia actual de las normas de clasificación se dirige a reducir su influencia (39). Por estas razones, se plantea la clasificación de estructuras existentes bajo un criterio de aplicación parcial de la norma, que atienda sólo a los nudos y a la desviación de la fibra. A este procedimiento puede objetar que ni siquiera pueden medirse todos los nudos. Es frecuente que no queden visibles todas las caras de la pieza. Al menos, la cara superior queda oculta por el material de entrevigado. No obstante, la cara superior normalmente es la zona comprimida y por tanto su influencia en flexión es algo menor que en la cara inferior. Utilizando el criterio de clasificación visual parcial (sólo nudos y desviación de la fibra), el porcentaje de rechazo se reduce a unos valores más aceptables (10%). El rendimiento de ambos criterios se recoge en la tabla 1.

En la tabla 2 se recogen las propiedades mecánicas para las calidades visuales considerando el criterio parcial. Aunque en el lote de madera estudiado había piezas de dos especies diferentes, las propiedades mecánicas se han considerado de manera agrupada debido a que no existen diferencias significativas entre ambos grupos. Se propone reunir todas las piezas en una única calidad (ME1+ME2), ya que en la práctica de una peritación no parece adecuado diferenciar calidades dentro de una misma zona de la estructura, sino estimar un valor general con suficiente seguridad.

Este grupo tiene un módulo de elasticidad de 9.000 N/mm² y un valor característico de la resistencia a flexión de 14 N/mm², aproximadamente.

Este procedimiento implica que la exigencia a aplicar en estructuras existentes corresponde a las especificaciones de la calidad ME2, pero utilizando únicamente los parámetros de tamaño de nudos y desviación de la fibra. La clase resistente asignada de acuerdo con la norma UNE-EN 338:2003 es función del valor característico de la resistencia a flexión, del valor medio del módulo de elasticidad y del valor característico de la densidad. El factor más restrictivo es la resistencia a flexión que limita la clase resistente apenas a una C14; ello limitaría el módulo de elasticidad a 7.000 N/mm², mientras que los módulos de elasticidad obtenidos para la muestra estudiada son de 9.000 a 10.000 N/mm². En piezas que trabajan a flexión, como las viguetas de forjado y las vigas, el parámetro más relevante en el cálculo es la limitación de la deformación y ésta depen-

Tabla 3. Rendimientos de la norma UNE 56544:2003

Especie	ME-1 (%)	ME-2 (%)	Rechazo (%)
Radiata	0,0	56,1	43,9
Silvestre	0,0	55,0	45,0
Laricio	0,8	60,8	38,4

Tabla 4. Rendimientos de la norma UNE 56544:2003 después de las modificaciones

Especie	MEG (%)	Rechazo (%)
Radiata	83	17
Silvestre	89	11
Laricio	85	15

Tabla 5. Propiedades físico-mecánicas después de las modificaciones. Calidad MEG

Especie	Nº	Tensión de rotura (N/mm ²)		Módulo de elasticidad (N/mm ²)	Densidad (kg/m ³)	
		5º percentil	valor medio	valor medio	5º percentil	valor medio
radiata	129	15,36	27,01	9.091	444	487
silvestre	107	25,95	39,51	10.501	444	505
laricio	102	21,17	45,00	10.957	510	595

de del módulo de elasticidad. Por esta razón, las clases resistentes propuestas se dividen en tres parámetros (Resistencia, Rigidez y Densidad); de esta forma no hay pérdida de propiedades mecánicas. Finalmente se propone para la asignación de las propiedades mecánicas en estructuras de madera existentes de gruesa sección de madera de coníferas en España un único grado de calidad visual para la norma UNE 56544:2003, ME1+ME2, correspondiente a una clase resistente con un valor característico de la resistencia a flexión de 14 N/mm² (F14), un valor medio del módulo de elasticidad de 9 kN/mm² (E9) y un valor característico de la densidad de 380 kg/m³ (D380).

La densidad de las piezas queda muy por encima de la correspondiente a la resistencia y módulo de elasticidad de la clase resistente. En general, la madera estructural utilizada en las edificaciones antiguas no había sido clasificada, y la variabilidad de la calidad conduce a un reducido valor característico para la resistencia a flexión. El valor medio del módulo de elasticidad y la densidad son valores de un orden similar a los que se obtienen de la madera actual.

3.2. Madera procedente de aserradero

La aplicación de la norma UNE 56544:2003 da lugar a un porcentaje de piezas rechazadas demasiado elevado para un aprovechamiento industrial de la madera en la construcción. El porcentaje de rechazo es de 44 a 45% para el radiata y el silvestre; en el laricio desciende al 38%. También puede observarse que la asignación de piezas a la calidad ME-1, es prácticamente despreciable, tabla 3. Además, las diferencias entre las propiedades mecánicas de la calidad ME-2 y el rechazo son despreciables y no significativas; es decir, la predicción de la norma es muy baja. Con el fin de reducir el porcentaje de rechazo y mejorar la predicción se propone una modificación de la norma UNE 56544:2003 estableciendo unas especificaciones propias para la madera de gran escuadría. Se considera gran escuadría a las piezas que tengan un grueso superior a 70 mm. Para esta categoría se establece una única calidad denominada MEG (Madera Estructural de Gruesa escuadría). Las especificaciones son las mismas que para la calidad ME-2, salvo las siguientes modificaciones relativas al entrecasco y

Tabla 6. Resistencia característica a flexión para diferentes tamaños de la sección en madera de calidad ME-2

Especie	Grueso b (mm)	Altura h (mm)	f_{mk} (N/mm ²)
Silvestre	40	100	18,80
	50	100	21,20
	40	150	19,20
	50	150	18,00
	70	150	21,50
	50	200	17,40
	70	200	19,30
	150	200	28,80
Laricio	200	250	23,30
	40	100	27,00
	50	100	27,80
	40	150	20,80
	50	150	19,10
	70	150	26,10
	50	200	20,50
	70	200	24,10
150	200	22,50	
200	250	23,60	

bolsas de resina y al tamaño del nudo de cara.

Se propone limitar la longitud del entrecasco y de las bolsas de resina a 1,5 veces la dimensión de la cara; es decir, $L \leq 1,5 \cdot h$, en lugar del valor absoluto de 80 mm; y la limitación del tamaño del nudo de cara a $2/3$ de la altura de la sección ($d \leq 2 \cdot h/3$) en lugar de $h/2$ que indica la norma actual. En la tabla 4 se muestran los rendimientos de clasificación visual utilizando las modificaciones propuestas.

Además, en la propuesta de la norma UNE 56544:2003 se ha eliminado la consideración de los nudos de margen (nudos cercanos a las aristas de la cara de la pieza).

El porcentaje de rechazo ha descendido a valores mucho más reducidos (11 a 17%) y además, las propiedades mecánicas no varían apenas respecto al resultado con la norma actual. Además, existen diferencias significativas en las propiedades mecánicas entre la calidad MEG y el rechazo. En la tabla 5 se recogen las propiedades mecánicas correspondientes.

3.3. Efecto del tamaño

Los ensayos realizados en este trabajo de investigación sobre madera procedente de aserradero han utilizado dos tamaños de la sección muy superiores a los utilizados con anterioridad en otros estudios para caracterizar estas especies. En el apartado 1.4 se exponían los trabajos realizados en España en relación al efecto del tamaño de la pieza en la madera de pino silvestre y pino

laricio (37). Estos trabajos habían utilizado secciones comprendidas entre 40x100 mm y 70x200 mm.

Es posible sumar los nuevos resultados obtenidos con las secciones de 150x200 y 200x250 mm al conjunto anterior para ahondar en la influencia de los parámetros de altura y grueso de la sección. En la tabla 6 se recogen los valores de resistencia característica a flexión, f_{mk} , para cada tamaño de la sección transversal obtenidos en los citados trabajos de investigación, además de los correspondientes a las piezas de gran escuadría.

Para evaluar el efecto del tamaño de la pieza sobre la resistencia se ha realizado una regresión no lineal según el modelo utilizado por Fernández-Golfín (37) que considera una sección de referencia con altura, h , de 150 mm y grueso, b , de 50 mm,

$$f_k = A \cdot \left(\frac{150}{h}\right)^B \cdot \left(\frac{50}{b}\right)^C$$

Los nuevos parámetros obtenidos para el caso del pino silvestre son: $A = 19,00$, $B = 0,27$ y $C = -0,32$, con un coeficiente de determinación, r^2 , igual a 0,78. Para el pino laricio los parámetros son: $A = 22,71$, $B = 0,43$ y $C = -0,17$, con $r^2 = 0,54$.

4. CONCLUSIONES

4.1. Sobre la peritación de la madera en estructuras existentes

La conclusión general de esta primera parte del proyecto, siempre teniendo en cuenta

que se refiere a madera de conífera (pino silvestre y pino pinaster) de gran escuadría procedente de tipos estructurales similares a los utilizados en los ensayos, se puede resumir en lo siguiente:

- Las piezas de madera utilizadas antiguamente en la edificación no presentan una selección en función de los parámetros empleados actualmente en las normas de clasificación visual. Por tanto, la variación de la calidad es muy elevada lo que conduce a un valor característico de la resistencia a flexión reducido. Sin embargo, el módulo de elasticidad medio alcanza, comparativamente, un valor más elevado al correspondiente a esa clase resistente.

- Si se utiliza la norma UNE 56544:2003 para la clasificación visual de la madera (considerando únicamente el criterio del tamaño de los nudos y la desviación de la fibra) el 90% de las piezas resultan de una calidad ME-2 con una resistencia característica a flexión de 14 N/mm² y un módulo de elasticidad medio de 9.000 N/mm².

4.2. Clases resistentes asignadas en madera procedente de aserraderos

La aplicación de la norma UNE 56544:2003 a la madera de gran escuadría da lugar a un excesivo porcentaje de rechazos (43%). Además, en la práctica no hay piezas de madera de gran escuadría que cumplan con los requisitos de la calidad superior, ME-1. La nueva categoría propuesta, MEG, para madera de gran escuadría mejora en alto grado

el rendimiento de la norma y la predicción de las propiedades resistentes.

La madera de calidad MEG para el pino silvestre y el pino laricio tiene unas propiedades mecánicas equivalentes a la clase resistente C22; algo superior a la indicada en la norma UNE 56544:2003, para la calidad ME-2. Hay que tener en cuenta que la asignación de la C18 en la norma se ha realizado con un criterio conservador eligiendo el menor valor característico de los obtenidos en las diferentes muestras por procedencias. Por otro lado, la calidad MEG del pino radiata no llega a alcanzar la clase C18 asignada para la madera de pequeña escuadría. Se trata de un hecho anómalo, que pudiera estar relacionado con la procedencia de las muestras y un incompleto muestreo. En todo caso debe tenerse en cuenta que el número de muestras ensayadas en este trabajo es muy reducido y que por tanto no es posible la asignación de la clase resistente de manera independiente sin tener en cuenta los resultados de otras muestras de escuadrías diferentes previamente estudiadas.

AGRADECIMIENTOS

Ministerio de Ciencia y Tecnología (Plan Nacional I+D+I 2000-2003. Proy.: AGL2002-00813). AITIM. CIFOR-INIA, Universidad Politécnica de Madrid (ETSIM). Universidad de Valladolid. Las piezas de pino radiata ensayadas proceden del proyecto AGL2004-01598FOR ejecutado en el CIFOR-INIA.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) UNE 56537. "Características físico-mecánicas de la madera. Determinación de la resistencia a la flexión estática" (1979).
- (2) ASTM D143-94. "Standard test methods for small clear specimens of timber" (2000).
- (3) Madsen, B. "Structural behaviour of timber". Timber Engineering LTD (1992). Canada.
- (4) Wood, L.W. "Relation of strength of wood to duration of load". Forest Products Laboratory Forest Service, US Department of Agriculture Report nº 1916, December (1951).
- (5) UNE EN 1995-1-1. "Eurocódigo 5. Estructuras de Madera. Parte 1: Reglas generales y reglas para la edificación".
- (6) "Documento Básico de Seguridad Estructural en Estructuras de Madera". Código Técnico de la Edificación. Ministerio de la Vivienda. Marzo 2006.
- (7) UNE-EN 408. "Estructuras de Madera. Madera aserrada y laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas" (2004).
- (8) UNE-EN 384. "Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad" (2004).
- (9) UNE-EN 14081-1. "Estructuras de madera. Madera estructural con sección transversal rectangular clasificada por su resistencia. Parte 1: Requisitos generales" (2006).
- (10) UNE-EN 338. "Madera estructural. Clases resistentes" (2003).
- (11) UNE-EN 1912. "Madera estructural. Clases resistentes. Asignación de las calidades visuales y especies" (2005).
- (12) DIN 4074-1. "Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit. Teil 1": Nadelschnittholz. "Clasificación de la madera según su capacidad resistente. Parte 1: Coníferas" (2003).
- (13) BS 4978. "Specification for visual strength grading of softwood". "Clasificación visual de la madera aserrada de coníferas" (1996).
- (14) NF 52001. "Classement visuel pour l'emploi en structures des bois sciés français résineux et feuillus". "Clasificación visual de la madera aserrada de coníferas y frondosas para uso estructural" (1998).

- (15) INSTA 142. "Nordiske regler for visuell styrkesortering av trelast". "Reglas nórdicas de clasificación visual de madera aserrada" (1997).
- (16) UNE 56544. "Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas" (2003).
- (17) Fernández-Golfín Seco, J.I., Gutiérrez Oliva, A., Baonza Merino, M.V., Díez Barra, M.R. "Características físico-mecánicas de las maderas de especies de crecimiento rápido de procedencia española". *Revista de Investigación Agraria* (1995) 4(2), pp.179-188.
- (18) Fernández-Golfín Seco, J.I., Díez Barra, M.R. "Growth rate as a predictor of density and mechanical quality of sawn timber from fast growing species". *Holz als Roh-und Werkstoff* (1996) 54, pp.171-174.
- (19) Fernández-Golfín Seco, J.I., Díez Barra, M.R., Gutiérrez Oliva, A. "Caracterización mecánica de la madera aserrada de pino silvestre de los sistemas Central e Ibérico mediante probetas de tamaño estructural". *Revista de Investigación Agraria* (1997) 6(1y2), pp.183-215.
- (20) Fernández-Golfín Seco, J.I., Díez Barra, M.R. "Caracterización mecánica de la madera aserrada de uso estructural clasificada visualmente de acuerdo con la norma UNE 56.544". *Mater. Construcc.* (1998) 48(252), pp.45-59.
- (21) Fernández-Golfín Seco, J.I., Díez Barra, M.R., Baonza Merino, M.V., Gutiérrez Oliva, A., Prieto Hermoso, E., Conde García, M., Van den Eynde, V.. "Caracterización de la calidad y las propiedades de la madera de pino laricio (*Pinus nigra*)". *Rev. de Investigación Agraria* (2001): 10(2), pp.311-332.
- (22) Salomon, B.. "Charpente traditionnelle: qualité et classement des bois de forte section". *CTBA Info* nº 85. (2000), pp 9-14.
- (23) UNE-EN 14081-2. "Estructuras de madera. Madera estructural con sección transversal rectangular clasificada por su resistencia. Parte 2: Clasificación mecánica. Requisitos adicionales para ensayo de tipo inicial" (2006).
- (24) UNE-EN 14081-3. "Estructuras de madera. Madera estructural con sección transversal rectangular clasificada por su resistencia. Parte 3: Requisitos adicionales para el control de la producción" (2006).
- (25) Newlin, J.A., Trayer, G.W. "Form factor of beams subjected to transverse loading only". *NACA report* nº 181 (1924).
- (26) Freas, A.D. and Selbo, M.L. "Fabrication and design of glued laminated wood structural members". *U.S. Dep. Agr. Tech. Bull.* 1069 (1954).
- (27) Weibull, W. "A statistical theory of the strength of materials". *Swedish Royal Inst. Eng. Res. Proc.*, Stockholm (1939).
- (28) Bohannon, B. "Effect of size on bending strength of wood members". *U.S. Forest Service Research Paper.* FPL 56. (1966) 30 pp.
- (29) Barrett, J.D. "Effect of size on tension perpendicular to grain strength of Douglas Fir". *Wood and Fibre* 6 (2) (1974), pp 126-143.
- (30) Mau, T.J. "Time and size effects for tension perpendicular to grain in wood". *Master Thesis, Departament of Civil Engineering, University of British Columbia* (1976).
- (31) Foschi, R.O. and Barrett, J.D. "Longitudinal shear strength of Douglas Fir". *Canadian Journal of Civil Engineering* 3 (2), (1975), pp. 198-208.
- (32) Lam, F. and Varoglu, E. (1990). "Effect of length on the tensile strength of lumber". *Forest Prod. J.* 40(5), pp.37-42.
- (33) Madsen, B. and Buchanan, A.I. (1986). "Size effects in timber explained by a modified Weakest-link theory". *Can. J. Civ. Eng.*, 13(2), pp.218-232.
- (34) Barrett, J.D. and Lau, W. "Canadian lumber properties". *Canadian Wood Council, Ottawa* (1994). 346 pp.
- (35) Barrett, J.D., Lam, F. and Lau, W. (1995). "Size effects in visually graded softwood structural lumber". *Journal of Mat. in Civil Eng.* 7(1), pp.19-30.
- (36) Hermoso, E., Fernández-Golfín, J.I., Díez, M.R.. "Análisis del factor de altura k_h en la madera aserrada estructural de pino silvestre". *Investigaciones Agrarias: Sist. Recur. For.* Vol. 11 (2), (2002), pp: 441-448.
- (37) Fernández-Golfín, J.I., Hermoso, E., Díez, M.R. "Análisis del efecto del volumen sobre la resistencia característica a flexión de la madera de los pinos silvestre y laricio de procedencia española". *Mater. Construcc.*, Vol. 52, nº 268 (2002), pp. 43-55.
- (38) Arriaga, F., Esteban, M. y Relea, E.. "Evaluation of the load carrying capacity of large cross section coniferous timber in standing structures" "Evaluación de la capacidad portante de piezas de gruesa escuadría de madera de conífera en estructuras existentes". *Mater. Construcc.* (2005). Vol. 55, nº 280, pp: 43-52.
- (39) Pedrotti, P., Paganini, F., Del Senno, M. (2000). "Longitudinal boring of beams". *Xylon International*, jul-aug, pp. 72-75.

* * *