

Análisis de parámetros de medición de fendas para la estimación de las propiedades mecánicas de vigas de madera de *Pinus sylvestris* L. (Analysis of parameters for assessing drying fissures to estimate their influence on the mechanical properties of *Pinus sylvestris* L. wooden beams)

Raquel Mateo

Ingeniero de Montes, AITIM
Madrid, España
r.mateo@aitim.es



María José Montero

Ingeniero Agrónomo
Univ. Politécnica de Madrid (Madrid, España)
mj.montero@upm.es



Guillermo Íñiguez-González

Doctor Ingeniero de Montes
Univ. Politécnica de Madrid (Madrid, España)
guillermo.iniguez@upm.es



Francisco Arriaga

Doctor Arquitecto
Univ. Politécnica de Madrid (Madrid, España)
francisco.arriaga@upm.es



Eva Hermoso

Doctor Ingeniero de Montes
CIFOR-INIA (Madrid, España)
hermoso@inia.es



Miguel Esteban

Doctor Ingeniero de Montes
Univ. Politécnica de Madrid (Madrid, España)
miguel.esteban@upm.es



Palabras clave – fendas, defectos, secado, madera

Keywords - fissures, cracks, drying, wood

RESUMEN

El principal objetivo de este estudio es evaluar la influencia de las fendas de secado en las propiedades mecánicas de vigas de madera. Para esto, se utilizan 40 vigas de Pino silvestre (*Pinus sylvestris* L) de 4200 mm de longitud y 150x200 mm de sección que fueron ensayadas según norma EN 408. Las fendas se registran detalladamente atendiendo a su longitud y posición en cada cara de la viga, y midiendo el espesor y la profundidad cada 100mm a lo largo de la viga. Solo el 10% de la muestra es rechazada por las fendas, según los criterios establecidos por la norma española de clasificación visual UNE 56544.

Para evaluar la influencia de las fendas en las propiedades mecánicas, se usan tres parámetros globales basados en el área, el volumen o la profundidad de la fenda, y dos locales basados en la profundidad máxima y la profundidad en la zona de rotura. Además se determina la densidad de las piezas.

Estos parámetros se comparan con las propiedades mecánicas (tensión de rotura, módulo de elasticidad y energía de rotura) y se encuentra escasa relación entre ellos. Las mejores correlaciones se encuentran entre los parámetros relacionados con la profundidad de las fendas, tanto con el módulo de elasticidad como con la tensión de rotura.

ABSTRACT

The aim of this study is the evaluation of the influence of drying fissures on the mechanical properties of timber beams. For that purpose, 40 sawn timber pieces of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) with 150x200 mm in cross-section and 4200 mm in length have been tested according to EN 408, obtaining MOR and MOE. The fissures were registered in detail measuring their length and position in each face of the beam, and the thickness and depth every 100 mm in length. Only 10 % of the pieces were rejected because fissures, according to UNE 56544 Spanish visual grading standard.

To evaluate the influence of fissures in mechanical properties three global parameters: Fissures Area Ratio or ratio between the area occupied by fissures and the total area in the neutral axis plane of the beam; Fissures Volume Ratio or ratio between volume of fissures and the total volume of the beam; Fissures Average Depth and two local parameters were used: Fissures Maximum Depth in the beam, and Fissures Depth in the broken zone of the beam. Also the density of the beams was registered.

These parameters were compared with mechanical properties (tensile strength, elasticity modulus, and rupture energy) and the relationship between them had not been founded. The best relationship was founded between the elasticity modulus y the tensile strength with the parameters which included the depth of the fissures.

1. Introducción

La madera es un material heterogéneo debido a su propia estructura fibrosa y a la presencia de singularidades en su composición. Actualmente existen métodos de clasificación visual que resultan de fácil aplicación para determinar las propiedades mecánicas de la madera aserrada para uso estructural; esta clasificación se basa en la identificación y cuantificación de las singularidades propias de la madera (nudos, fendas, gemas, acebolladuras, desviación de la fibra), y por medio de éstas asignar a la madera una calidad. Las calidades para las diferentes especies se asignan a una clase resistente. Bien es conocida la influencia de algunas de estas singularidades, como el efecto de los nudos y la desviación de la fibra pero, en cuanto a las fendas, aunque está incluido como criterio de clasificación en las normativas europeas, no se conoce con exactitud su influencia en las propiedades resistentes.

Entre las normas de clasificación visual empleadas en el ámbito de la Unión Europea, en la que se utiliza el sistema de clases resistentes, están la alemana DIN 4074, la británica BS 4798, la francesa NF B 52001, la nórdica INSTA 142 y la española UNE 56544. En Europa las normas correspondientes que se utilizan para asignar clases resistentes son UNE EN 1912 y UNE EN 338.

Se denomina fenda a toda grieta o fisura longitudinal que se extiende cortando los anillos de crecimiento. Según sea la causa que las origina y su naturaleza, las fendas se clasifican en:

- *Fendas de viento*: son fendas que se producen cuando el árbol está vivo, causadas por el esfuerzo externo del viento sobre la copa que se transmite a través del fuste.

- *Fendas de heladura*: son fendas que se producen cuando el árbol está en pie, como consecuencia de temperaturas especialmente bajas durante la época de reposo vegetativo invernal.

- *Fendas de secado*: son fendas que se producen una vez que el árbol muere, momento a partir del cual, la humedad de la madera tiende a equilibrarse con la del medio ambiente que le rodea. Se producen por diferencias entre la contracción radial y la contracción tangencial durante el secado de la madera. Cuando una pieza de madera pierde humedad, la dirección tangencial merma más deprisa y en mayor medida que la radial, lo cual da lugar a tensiones internas que producen una separación de las fibras, que son las fendas de secado.

- *Fendas de rayo*: producidas por un rayo.

- *Fendas de apeo*: se originan durante el abatimiento del árbol y se manifiestan en el extremo grueso del fuste, extendiéndose longitudinalmente.

- *Fendas pasantes*: son las que atraviesan completamente la pieza.

Las fendas de secado aparecen en la madera de forma generalizada, y en mayor o menor medida dependiendo del tipo de secado y del tamaño de la sección. En las secciones de gruesa escuadría su aparición es prácticamente inevitable. Las fendas no suelen atravesar completamente la sección, y no suelen desarrollar una longitud excesiva. Esto sugiere que se pueda seguir considerando la pieza como un elemento único.

Se tiene la opinión generalizada de que la influencia de las fendas es relativamente pequeña, aunque no existe demasiado fundamento en esto. Se han realizado hasta la fecha pocos estudios debido a la difícil tarea de evaluar las fendas, algunos basados en análisis teóricos formando fendas artificiales (Newlin J.A., et al, 1934), atendiendo otros a la longitud de fendas pasantes (Barret, J.D, et al, 1976), tratando de relacionar esta singularidad de la madera con la resistencia a cortante del material. También existen estudios a cerca del efecto de las fendas de corazón con respecto a las propiedades de flexión, obtenidas por secado natural en piezas procedentes de edificios antiguos (Green D.W, et al, 2001), encontrando que tienen efecto sobre el módulo resistente pero no sobre el módulo de elasticidad.

Las fendas generalmente provocan alarma e inseguridad en los usuarios; la aparición de fendas suponen una de las principales causas de reclamaciones e importantes gastos para la realización de informes y peritaciones que traten de evaluar su efecto, dejando de un lado las consideraciones estéticas, sobre la seguridad estructural (Esteban, 2003).

2. Objetivo

El principal objetivo de este estudio es conocer el efecto que provocan las fendas en la resistencia de vigas de gruesa escuadría. Además se pretende desarrollar una metodología para la medición de fendas a partir de índices que estimen de manera global y local su presencia en la madera aserrada estructural.

3. Metodología

En este estudio se analizaron 40 vigas de madera aserrada de *Pinus sylvestris L.* de 4200 mm de longitud y de 150x200 mm de escuadría, procedentes del monte de El Espinar, Segovia (España). Estas piezas se recibieron en el laboratorio y presentaban fendas generalizadas. La muestra se seleccionó procurando formar un lote lo más homogéneo posible en lo relacionado con otros parámetros de clasificación visual y en el módulo de elasticidad dinámico, con el objeto de poder realizar comparaciones específicamente relacionadas con las fendas.

Las fendas fueron evaluadas a través de varios parámetros, tres atendiendo a la globalidad de la pieza: FAR (área ocupada por fendas en el plano de rasante), FVR (volumen de fendas con respecto al total de la viga) y FAD (profundidad media de fendas); y dos locales: FMD (máxima profundidad de fenda según UNE 56544 y FBD (profundidad de fenda en la zona de rotura).

Estos parámetros se relacionaron con tres propiedades resistentes: tensión de rotura, el módulo de elasticidad y la energía de rotura, para determinar si existe influencia de las fendas en las propiedades mecánicas del material y determinar cuál de ellos podría ser el mejor estimador visual de fendas.

3. 1. Medición de fendas

Podrían considerarse muchas maneras de medir las fendas existentes en una viga de madera aserrada, atendiendo a su anchura, longitud o su profundidad; pero en este punto y tras analizar estudios en esta línea, se propone desarrollar otros índices estimadores de la magnitud de la fenda basados en áreas y volúmenes de fenda, como se explica más adelante.

Previo a la determinación de estos nuevos parámetros, es necesario cuantificar de manera exhaustiva la profundidad, longitud y anchura de las fendas que se encontraban a lo largo de la viga. Para ello se registraron de las dos caras de la viga los siguientes datos:

- coordenadas inicial y final de cada fenda
- profundidad en mm de cada fenda cada 100 mm, que se anotaron en la propia viga
- anchura máxima de fenda (mm)
- posición, en coordenadas, de la anchura máxima de fenda

Cuando se encontraban dos fendas muy juntas se consideró que es la misma fenda si la distancia entre ellas es menor de 10 mm. Todas estas mediciones se realizaron en condiciones de humedad en torno al 10% de media.

Además se hicieron fotografías de las caras y cantos de la viga para su posterior utilización en la realización de esquemas de las piezas (Fig. 1).

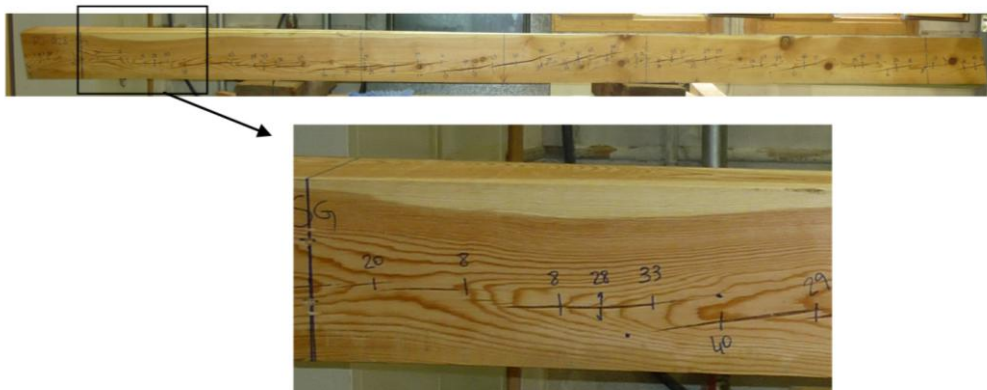


Figura 1 - Pieza (entera y detalle) con fendas anotadas en la cara

Con estos datos se obtuvieron los siguientes parámetros:

Índice de área de fendas (FAR)

A partir de los datos de profundidad anotados cada 100 mm a lo largo de la longitud de la fenda se realizó una representación de las caras y de la proyección vertical de las fendas sobre el plano de rasante próximo a la fibra neutra (Fig. 2).

Éste índice permite evaluar la pérdida de área en el plano de rasante, consecuencia de las fendas, en el cual la tensión tangencial es máxima.

La finalidad de este índice sería evaluar la influencia de las fendas sobre el efecto del cortante, puesto que la reducción de área en el plano de rasante por efecto de las fendas tiene como consecuencia un aumento de la tensión de cortante en el plano medio.

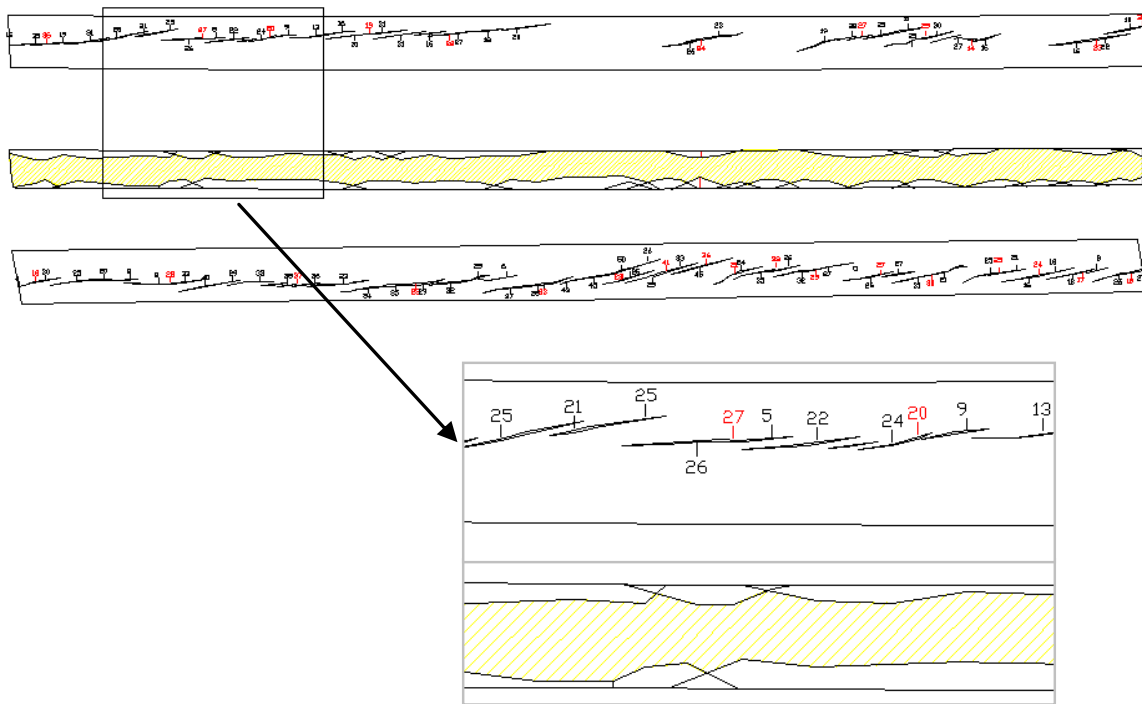


Figura 2 - Esquema general y detalle del plano de rasante de una de las vigas

Índice de volumen de fendas (FVR)

En este punto se trató de estimar un volumen ocupado por las fendas con respecto al volumen total de la viga. El volumen total de la viga se obtiene como volumen de un paralelepípedo. El volumen de las fendas se estima asemejándolo al de una pirámide (Ecuación 1).

$$Vol_{fenda} = \frac{A_{fendaencara} \times prof_{m\acute{a}xima}}{3} \quad (1)$$

siendo:

$A_{fendaencara}$: área en mm² de cada fenda obtenida por planimetría
 $prof_{m\acute{a}x}$: la profundidad máxima de cada fenda en mm

La finalidad de este índice es similar al anterior pero en este caso además se tuvo en cuenta el espesor de la fenda.

Profundidad media de fenda (FAD)

Del registro de todas las profundidades de fenda a lo largo de la viga cada 100 mm, se realizó la profundidad media de cada fenda en las dos caras, y de cada cara la media de medias. La suma de la media de medias de cada cara es la que se consideró como profundidad media de fenda.

$$p_{med,fenda} = prof_{cara1} + prof_{cara3} \quad (2)$$

siendo:

$$prof_{cara1} = media(p_{med,fenda1,1}; p_{med,fenda1,2}; \dots; p_{med,fenda1,x}) \quad (3)$$

la profundidad media de las medias de las fendas de la cara 1 (Ecuación 3),

$$prof_{cara3} = media(p_{med,fenda3,1}; P_{med,fenda3,2}; \dots; P_{med,fenda3,x}) \quad (4)$$

la profundidad media de las medias de las fendas de la cara 3 (Ecuación 4).

Profundidad máxima de fenda (FMD)

La norma española de clasificación visual de madera aserrada UNE 56544 establece un criterio de medición de fendas atendiendo a su profundidad máxima, medida en las dos caras. Como criterio de evaluación, se basa en determinar la proyección de la profundidad de las fendas sobre el canto de la sección. Las fendas cuya anchura que no superen 1mm, pueden despreciarse.

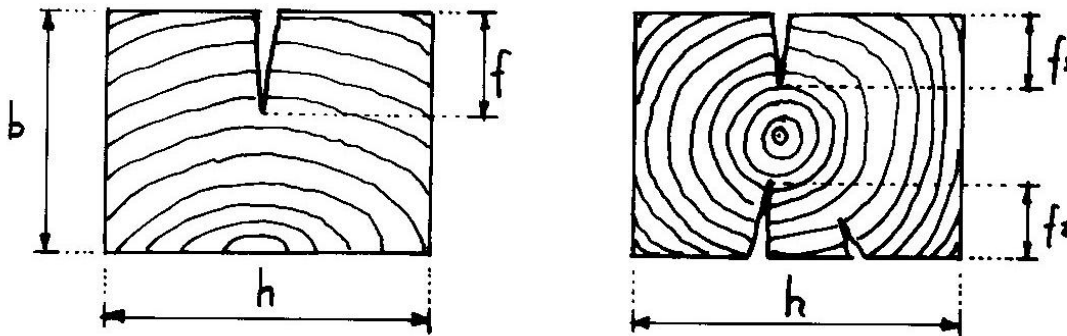


Figura 3 - Evaluación de fendas según norma UNE 56544

La profundidad de las fendas se evalúa como f/b o, en caso de presentar fendas por ambas caras, como $(f_1 + f_2) / b$ (Fig. 3).

Teniendo en cuenta en las mediciones realizadas y en la representación gráfica, se pudo conocer con exactitud cuál es la profundidad máxima encontrada en la viga y su localización (Fig. 4).

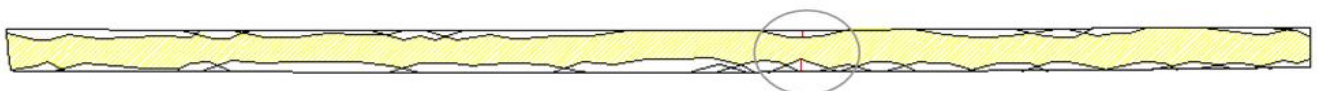


Figura 4 - Localización de la profundidad máxima de fenda en la viga

En la norma UNE 56544 se establece una calidad para la madera aserrada de gruesa escuadría, MEG. La especificación, en cuanto a fendas, para la clasificación de la madera en piezas de sección rectangular es la que indica la tabla 1:

CRITERIOS DE CALIDAD		MEG
FENDAS	De contracción (secado)	$f \leq 3 / 5 \cdot b$
	Acebolladuras Rayo Heladura Abatimiento	No permitidas

Tabla 1 - Criterios de calidad de la madera de gruesa escuadría según las fendas

El resultado de la clasificación visual atendiendo a las fendas y a los demás criterios se muestra en la tabla 2:

Criterio	Nº de piezas	% MEG	% Rechazo	Motivo del rechazo
Fendas	40	90	10	Fendas 100%
UNE 56544 (sin fendas)	40	62,5	37,5	Nudos 7,5% Alabeo 27,5% Entrecasco 2,5%
UNE 56544	40	62,5	37,5	Nudos 2,5% Fenda+otro 7,5% Alabeo 25% Entrecasco 2,5%

Tabla 2 – Rendimiento de la clasificación visual según diferentes criterios

Profundidad de fenda de la zona de rotura (FBD)

Tras el ensayo de flexión, que se explica en el punto siguiente, se puede localizar la sección de rotura, y es en ese punto donde se mide la profundidad de fenda en la zona de rotura.

3.2. Determinación de la densidad

De cada viga se obtuvo la densidad como la relación entre el peso y el volumen. Ésta densidad se determinó mediante una técnica no destructiva de pesada de la pieza en una balanza y el volumen nominal de la misma.

3.3. Ensayo de flexión

Las 40 vigas se ensayaron a flexión según procedimiento de la norma UNE EN 408. La probeta se colocó simplemente apoyada, con una luz igual a 18 veces la altura de la sección (h) y con cargas en los tercios de la luz (Fig. 5):

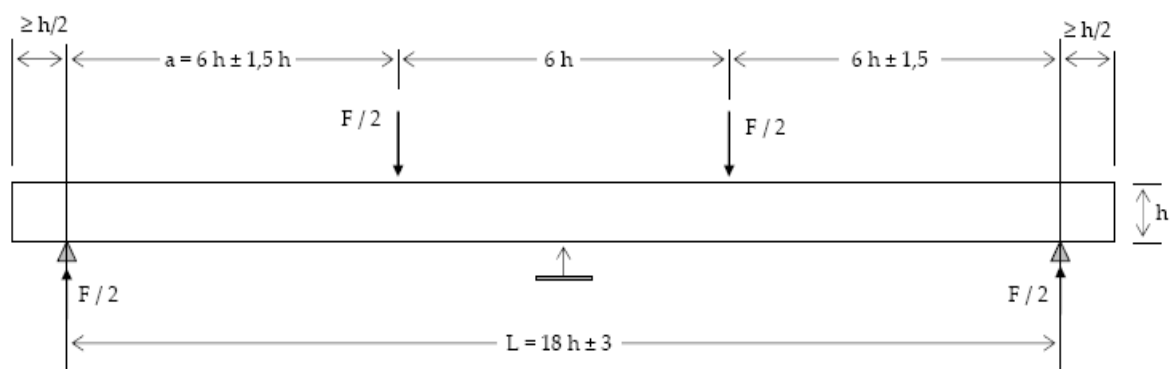


Figura 5 - Disposición del ensayo de flexión

Mediante este ensayo se evaluaron el módulo de elasticidad global y la resistencia a flexión.

Tensión de rotura (TDR)

La tensión de rotura o resistencia a flexión (N/mm^2) se obtiene a partir de la siguiente expresión (Ecuación 5):

$$\sigma = \frac{3 \cdot F_R \cdot a}{b \cdot h^2} \quad (5)$$

donde:

F_R : carga de rotura (N)

a: distancia en mm entre el punto de apoyo y el punto de carga

b: anchura de la pieza en mm de la sección de rotura

h: altura de la pieza en mm de la sección de rotura

Módulo de elasticidad global (MOE)

El módulo de elasticidad global (N/mm^2) se obtiene a partir de la deformación medida por un captador colocado en el centro del canto inferior de la pieza. El módulo de elasticidad se calcula mediante la siguiente expresión (Ecuación 6):

$$E_{glo} = \frac{L^3 \cdot (F_2 - F_1)}{b \cdot h^3 \cdot (w_2 - w_1)} \cdot \left[\left(\frac{3 \cdot a}{4 \cdot L} \right) - \left(\frac{a}{L} \right)^3 \right] \quad (6)$$

donde:

a: distancia en mm entre el punto de apoyo y el punto de carga

L: longitud en mm del vano entre apoyos

$F_2 - F_1$: incremento de la fuerza en N, producido en el tramo elástico

$w_2 - w_1$: incremento de las deformaciones en mm producido en el tramo elástico

b: anchura de la pieza en mm

h: altura de la pieza en mm

Energía de rotura (W)

La energía de rotura (J) se obtiene como la mitad de la carga de rotura por el recorrido de la carga en el momento de la rotura (Ecuación 7):

$$W = \frac{F_R \cdot \delta_R}{2} \quad (7)$$

donde:

F_R : carga de rotura (N)

δ_R : recorrido de la carga en el momento de la rotura (m)

4. Discusión de resultados

Analizando todos los factores de estimación de fendas frente a las propiedades mecánicas, cabe destacar la nula relación existente entre éstas y la profundidad de fenda en la zona de rotura (FBD) de las vigas (R^2 menor al 1%).

Del total de la muestra existe un 10% de rechazo atendiendo únicamente al criterio de fendas que establece la norma UNE 56544, pero con respecto a las propiedades mecánicas no existe diferencia entre las clasificadas como estructurales (MEG) y las de rechazo (Fig. 6).

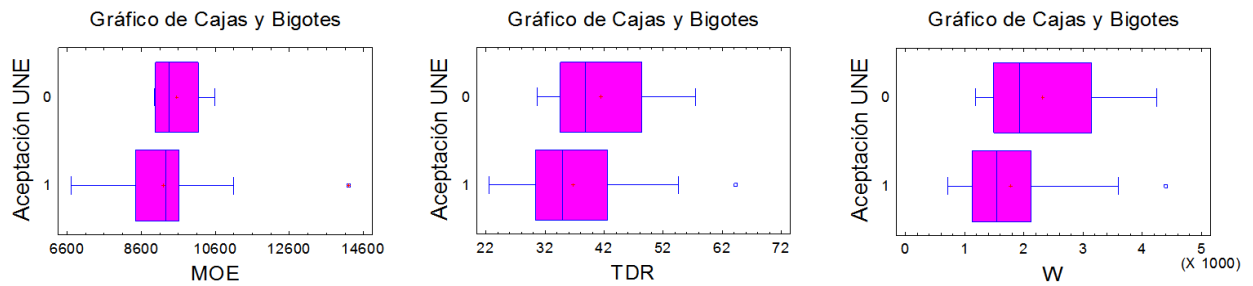


Figura 6 - Descripción de la muestra según criterio de aceptación de fendas según UNE 56544
 Aceptación de fendas por UNE 56544: MEG=1 y Rechazo=0
 MOE=módulo de elasticidad (N/mm²), TDR=tensión de rotura (N/mm²)
 y W=energía de rotura(J)

Los valores del coeficiente de determinación (R^2 %) de las relaciones más relevantes se muestra en la Tabla 3.

	MOE	TDR	W
Densidad	22,27	20,04	19,88
FAD	21,24	20,14	16,24
FMD	19,52	24,08	23,09
Densidad + FAR	30,34	28,07	29,29
Densidad + FVR	28,25	31,82	27,80
Densidad + FAD	37,13	34,22	30,82
Densidad + FMD	35,76	20,04	19,88

Tabla 3 - Valores del coeficiente de determinación en % (R^2) entre variables

La densidad en todos los caso ofrece la misma relación con las propiedades mecánicas, con un R^2 de en torno a un 20 %. Sin embargo, los parámetros de fendas globales con respecto a las propiedades mecánicas ofrecen escasa relación por sí solos, encontrando la mejor correlación entre el módulo de elasticidad y la profundidad media de fendas FAD ($R^2 = 21,24$ %). El índice de área FAR y el de volumen FVR no parecen ser buenos estimadores de la resistencia o la elasticidad. Realizando una regresión múltiple incluyendo la densidad con los parámetros de fendas, se encontró que la densidad junto con FAD encuentran una buena relación con el MOE ($R^2 = 37,13$ %) y TDR ($R^2 = 31,82$ %).

En el caso de la profundidad de fendas (FMD) se encontró que este parámetro ofrece una buena relación con las propiedades mecánicas, encontrándose un R^2 de 20,14 entre ésta y la tensión de rotura ajustado a un modelo de regresión lineal, e incluyendo la densidad en una regresión múltiple se pudo obtener que con el MOE tiene un $R^2 = 35,76$ %, con TDR de 34,22 % y con la energía de rotura de 30,82 %.

5. Conclusiones

Las fendas de secado, salvo en casos extremos, no son la causa habitual de la rotura en una determinada zona de la viga. La rotura se produce en una parte por cualquier otra particularidad como los nudos o la desviación de la fibra.

De todas las vigas analizadas siguiendo el criterio que establece la norma española de clasificación visual UNE 56544, se obtiene un rechazo de vigas por fendas de un 10 %, pero no se encuentra diferencia entre ellas en cuanto a las propiedades mecánicas.

No parece existir una relación significativa entre las propiedades resistentes de la madera con las fendas estudiadas a partir de los parámetros que tienen en cuenta el área del plano de rasante tras descontar las fendas y el volumen residual de madera. Sin embargo la profundidad media de fendas (FAD) y la profundidad máxima de fenda (FMD) medida según la norma UNE 56544 podría Atener influencia, teniendo en cuenta además la densidad de la madera.

Los parámetros evaluados no resultaron sensibles para evaluar el efecto de las fendas en el comportamiento mecánico de las vigas.

Agradecimientos

Proyecto de Investigación BIA2006-14272. Influencia de algunos defectos en las propiedades mecánicas de la madera de gran escuadría para uso estructural: fendas de secado y defectos de aserrado. Ministerio de Educación y Ciencia, Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica 2004 - 2007. Universidad Politécnica de Madrid.

Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias y Alimentarias, INIA. Laboratorio de Estructuras de Madera.

Referencias Bibliográficas

- Esteban, M; Arriaga, F; Íñiguez, G; Bobadilla, I y Mateo, R. (2010) "Influencia de las fendas en la resistencia de la madera estructural". *Mater. Construcc.*, vol 60, nº 299 (2010), pp.115-132, doi:10.3989/mc.2010.48208.
- Newlin, J.A. (1934) "Shear in checked beams". *Amer. Ry. Engin. Assoc. Bull.* 364. 1001-1004, illus.
- Newlin, J.A.; Heck, G.E. and March, H.W. (1934) "New method of calculating longitudinal shear in checked wooden beams". *Amer. Soc. Mech. Engin. Trans.*, 56: 739-744 illus.
- Barret, J.D. and Foschi R.O. (1976) "Shear strength of uniformly loaded dimension lumber". *Canadian Journal of Civil Engineering*, 4, 86. doi:10.1139/I77-009.
- Green D.W., Falk, R.H. and Lantz, S.F. (2001) "Effect of heart checks on flexural properties of reclaimed 6 by 8 Douglas-fir timbers" *Forest Products Journal*, vol 51, nº 7/8, pp.82-88.
- Esteban, M. (2003): *Determinación de la capacidad resistente de la madera estructural de gran escuadría y su aplicación en estructuras existentes de madera de conífera*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, ETS de Ingenieros de Montes. 365 p. PDF file: <http://oa.upm.es/1404>.
- Mateo, R. (2005): *Análisis de la influencia de las fendas en la capacidad resistente de piezas de madera*. Proyecto Fin de Carrera. ETS de Ingenieros de Montes. 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, ETS de Ingenieros de Montes. 223 p. PDF file: <http://oa.upm.es/415>.
- Arriaga, F.; Íñiguez, G.; Esteban, M. y Bobadilla, I. (2007): "Madera aserrada de gran escuadría para uso estructural y sus particularidades". *Informes de la Construcción*, vol 59, nº 506, pp. 29-41, ISSN:0020-0883.

Normativa

- DIN 4074. *Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit*.
- BS 4798. *Visual strength grading of softwood. Specification for visual grading of softwood*.
- NF B 52001. *Règles d'utilisation du bois en structure*.
- INSTA 142. *Nordic visual stress grading rules for timber*.
- UNE 56544. *Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural: madera de coníferas*.
- UNE EN 1912. *Madera estructural. Clases resistentes. Asignación de calidades visuales y especies*.
- UNE EN 338. *Madera estructural. Clases resistentes*.
- UNE EN 408. *Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas*.