



Kurú: Revista Forestal (Costa Rica) 6 (17), 2009

NOTA TÉCNICA

**Ensayos no destructivos sobre madera estructural.
Una revisión de 30 años en España**

Jorge Carballo Collar¹
Eva Hermoso Prieto²
Rafael Díez Barra³

Resumen

Se efectúa una revisión de los trabajos de investigación y desarrollo llevados a cabo por diversos grupos presentes en España en los últimos 30 años. Se describen las técnicas y equipos no destructivos más utilizados en este período. Se exponen los resultados y se comentan las ventajas, inconvenientes y los retos futuros. Además, se exponen las líneas de trabajo de los diferentes grupos con la intención de facilitar el contacto y colaboración con otros equipos fuera de España.

Palabras claves: Técnicas no destructivas, Madera estructural, Grupos de trabajo, España.

Abstract

The authors describe the techniques and equipment used in non-destructive wood and structural timber tests during the last 30 years in Spain. They present the results and describe the advantages and problems related to these tests, and make suggestions for future test. In addition, they present work-lines of research groups in Spain to facilitate the communication among other works outside the country.

Key words: Non destructive techniques, Structural timber, Research groups, Spain.

¹ Departamento de Industrias Forestales, CIFOR-INIA, P.O. Box: 8111, 28080 Madrid, España.
jcollar@inia.es

² Idem. hermoso@inia.es

³ Idem. jrdiez@inia.es

INTRODUCCIÓN

Esta revisión se realizó por invitación de los organizadores del “II Taller Latinoamericano de técnicas no destructivas para productos de madera”; celebrado en Costa Rica del 2 al 4 de diciembre del 2008. Se pretende presentar al colectivo de investigadores y tecnólogos las técnicas y las líneas de trabajo que se desarrollan en España en el campo de los ensayos no destructivos sobre madera aserrada de uso estructural. El objetivo de esta revisión es buscar sinergias entre colegas, que permitan el inicio de trabajos conjuntos ibero-americanos en este campo de investigación.

En España, la actividad que nos ocupa se desarrolla fundamentalmente en universidades, organismos públicos de investigación y centros tecnológicos financiados con dinero público (Esteban *et al*, 2007). Por el contrario, la participación de las empresas privadas en la investigación es muy limitada en el campo de la madera aserrada.

El grueso de los profesionales que participan en los equipos de trabajo está constituido por arquitectos e ingenieros de montes, conocidos en América como ingenieros forestales. Sin embargo, hay una participación creciente de físicos y biólogos que convierten a los equipos en multidisciplinarios. Esta variedad de perfiles incrementa el conocimiento y facilita el avance de los trabajos.

En España, las técnicas no destructivas en la madera aserrada se investigan con dos objetivos: clasificar el material según su resistencia, elasticidad y densidad, o diagnosticar el estado de conservación de una estructura. Por lo tanto, las técnicas no destructivas nos aportarán, en ambas situaciones, información sobre las propiedades mecánicas y físicas del material.

En este artículo, el primer apartado enumera las técnicas no destructivas, el objeto de su utilización y los equipos más utilizados en España. Posteriormente, en resultados se explicará la evolución del uso de las técnicas, los logros más importantes, y las líneas de investigación activas y futuras.

TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS

Se presenta una agrupación de las técnicas en función de la portabilidad del equipo utilizado para su aplicación. La denominación de “portátiles” se aplica a aquellas técnicas implementables en equipos de fácil transporte. La denominación de “fijas” se aplica a aquellas técnicas que necesitan de máquinas instaladas en industrias o laboratorios; debido básicamente a las dimensiones del equipo.

Técnicas portátiles

Evaluación visual:

La evaluación visual consiste en la observación directa de las singularidades que presenta la madera. Básicamente, la evaluación compara el tamaño de las singularidades respecto a las dimensiones de la pieza evaluada, según se especifica en una norma de clasificación visual (Fernández-Golfín *et al*, 2003). El resultado de la evaluación clasifica el material en calidades asociables con características mecánicas conocidas. Entre las singularidades que más influyen en la pérdida de calidad de los productos estructurales de madera destacan: presencia de nudos, desviaciones de fibra, deformaciones y ataques biológicos.

Es una técnica de evaluación imprescindible para los técnicos antes de adentrarse en otras técnicas no necesariamente más complejas, pero que necesitan inversiones para su implementación en laboratorio, aserradero y obra. Dada la versatilidad y sencillez de esta técnica, es operativa en todos los ámbitos de actuación: laboratorio, industria y rehabilitación de edificios.

En Europa, cada país tiene una norma para las especies que son aprovechadas en su territorio, lo cual implica que en cada país existen diferentes denominaciones para las calidades visuales. Afortunadamente, los esfuerzos de normalización de la UE han conseguido elaborar un lenguaje común a través de las clases resistentes (EN 338), las cuales definen qué valores mecánicos y físicos mínimos ha de tener un lote de madera al que se le asigna una clase resistente. Por lo tanto cada país ha calculado qué clase resistente le corresponde a cada combinación de calidad y especie y estos resultados se recogen en la norma EN 1912. Así es más sencillo utilizar madera clasificada visualmente, independientemente del origen de la madera y la clasificación visual utilizada.

Contenido de humedad:

Dada la importancia que la humedad tiene en el comportamiento y propiedades de la madera, una medición fiable de la misma es esencial en cualquier actuación. El xilohigrómetro (Figura 1) se utiliza en todos los escenarios para asegurar que las prescripciones establecidas para el contenido de humedad son cumplidas antes de instalar la madera o en rehabilitación para corregir la estimación de la resistencia residual. Existen otros equipos para medir el contenido de humedad que no son comentados en este artículo, pues su presencia en la industria española es escasa hasta el momento.

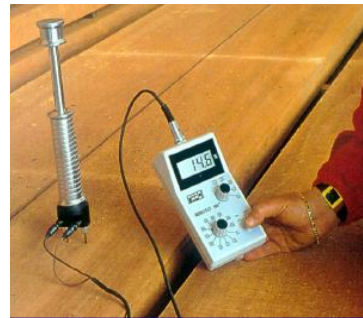


Figura 1. Xilohigrómetro.

Ultrasonidos:

Su utilización primigenia fue sobre metales y posteriormente en hormigón (como la mayoría de las técnicas que estamos exponiendo) para pasar en los años 50 a utilizarse sobre madera. La técnica permite, a partir de la velocidad de paso de la onda y con una buena estimación de la densidad, predecir el módulo de elasticidad en obra y en laboratorio.

Dada la portabilidad de los equipos disponibles y el precio relativamente bajo, es de amplia utilización por todos los grupos de trabajo implicados en la evaluación de madera estructural. El aparato más común en España es el Sylvatest® que opera con una frecuencia de 22 kHz (Figura 2a).

Otro equipo utilizado habitualmente se basa en la generación de ondas de impacto y es el Microsecond Timer de la empresa Fakopp. Este equipo se distingue del anterior en la frecuencia de emisión de la onda acústica (23 kHz) y en la forma de producirla, ya que es por excitación mecánica mediante un golpe sobre uno de los sensores (Figura 2b).

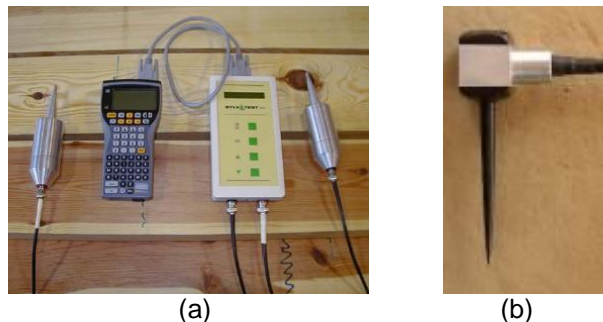


Figura 2. Equipos portátiles para el uso de las técnicas de ultrasonidos: Sylvatest Duo (a) y detalle del transductor Microsecond Timer de la casa Fakopp (b).

Análisis de vibraciones:

Aprovecha el conocido fundamento del diapasón y se basa en el estudio y análisis de las vibraciones producidas en el material y la frecuencia propia del mismo. La mecánica del ensayo consiste en impactar con un martillo sobre la pieza estudiada para producir esas vibraciones.

El equipo más utilizado en España es también de la empresa Fakopp y se denomina PLG (Portable Lumber Grader-Clasificador portátil para madera) (Figura 3). El equipo contempla la medida de la velocidad de transmisión de la onda vibratoria y de la densidad, proporcionando una muy buena estimación de los módulos de elasticidad de cada pieza en estudio.

Es importante señalar que la pieza a evaluar no debe estar empotrada por lo que esta técnica se ciñe a su utilización en laboratorio e industria de producción de madera o en control del material a la recepción en obra.



Figura 3. Equipo PLG para análisis de vibraciones también de Fakopp.

Densitómetros:

Como su nombre indica, estos equipos están orientados a determinar la densidad de la madera. La densidad es un buen indicador de las propiedades mecánicas de la madera, sin embargo las estimaciones son puntuales y su información debe ser complementada por otros métodos. Además, la densidad puede combinarse con la técnica de ultrasonidos o vibratoria para calcular el módulo de elasticidad dinámico, que es un buen estimador de la elasticidad real del material.

En España se utilizan básicamente tres equipos cuyo principio básico es el mismo. Uno de ellos es el *penetrómetro* que sustituye al clásico punzón utilizado en la evaluación de estructuras nuevas o de rehabilitación. Este aparato derivado del utilizado en hormigones (esclerómetro), proyecta una aguja normalizada sobre la pieza en estudio. En función de la profundidad alcanzada se pueden estimar valores de dureza y densidad (Figura 4a).

Para el mismo fin se utiliza el *resistógrafo*, el cual consiste en un taladro eléctrico que se introduce con velocidad de avance constante en el material ensayado y mide, por medio del consumo de potencia eléctrica, la mayor o menor resistencia ofrecida. Con el tiempo, este instrumento ha sido aligerado para conseguir una relativa facilidad de transporte y uso, lo que le convierte en una técnica muy adecuada para la inspección de estructuras en servicio. El taladro realiza perforaciones en torno a los 3 mm de diámetro. Se utiliza generalmente para verificar el estado de ciertos puntos críticos.

El tercero es el *arrancador de tornillos*, equipo muy sencillo cuyo principio es contrario a los anteriores. Consiste en extraer un tornillo, de dimensiones establecidas y situado a una profundidad exacta. En este caso se mide la fuerza necesaria para extraerlo (Figura 4b).

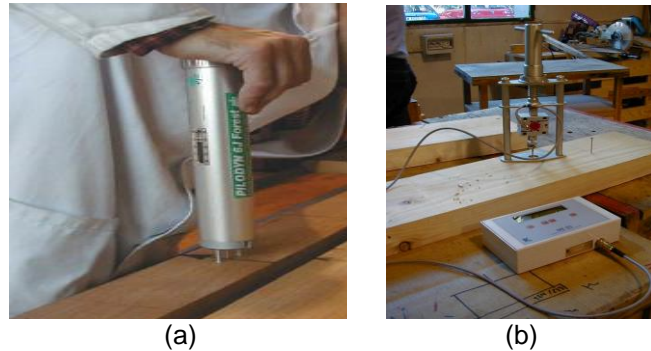


Figura 4. Penetrómetro modelo Pylodin (a) y equipo portátil para realizar el arranque de tornillos manufacturado por la casa Fakopp (b).

Georradar:

Posiblemente es la más novedosa adaptación de técnicas procedentes de otros materiales. El grupo de la Universidad Politécnica de Valencia dispone del georradar (GPR) para determinar la variación del contenido de humedad en vigas de madera. Además, han hecho estudios orientados a la clasificación del material. Esta técnica se basa en la emisión y recepción de ondas electromagnéticas que se propagan por un medio heterogéneo con frecuencias comprendidas entre los 10 MHz y 2 GHz.

El georradar se diseñó para propagar energía en el subsuelo o cualquier otro medio material. La incidencia de esta energía en las heterogeneidades del medio provoca fenómenos de reflexión, refracción y difracción, que pueden ser detectados por una antena receptora que capta la energía electromagnética tras su propagación por el medio material.

Para los estudios realizados sobre madera estructural se ha empleado un equipo de georradar GSSI modelo SIR-10H, con una antena de frecuencia central de 1,5 GHz.

En la actualidad se trabaja en la detección de diferencias de densidad tanto en laboratorio como en estructuras de edificios históricos. Es una herramienta transportable y por tanto, de relativa facilidad de uso en estructuras.

Técnicas fijas

Clasificación mecánica automática:

A partir de los años 60 se desarrollan en Europa y USA diversas máquinas de clasificación mecánica de la madera estructural. En la mayoría de los casos, el parámetro obtenido es el módulo de elasticidad del material. Habida cuenta que el factor limitante de la bondad del material, al menos en las maderas estudiadas en España, es el comportamiento elástico (Fernández-Golfín *et al.*, 1998), podemos concluir que es un sistema de aplicación inmediata en aspectos industriales.

La versión más sencilla de este tipo de utensilio es la denominada *máquina de ensayos universal* (Figura 5a). El procedimiento consiste en un ensayo a flexión biapoyado sometiendo la pieza a carga durante el tramo de comportamiento elástico del material. A partir del diagrama fuerza-deformación se calcula, por las formulas clásicas de la mecánica, el módulo de

elasticidad. Esta adaptación es de utilización habitual en laboratorio y está siendo empleada en la caracterización de maderas comercializadas en España de acuerdo a la normativa de la UE.



Figura 5. Máquina universal de ensayos (a) y clasificadora mecánica automática Cook-Bolinder de la casa SG-AF Techmac (b).

Considerando lo expuesto, diversos fabricantes mundiales han creado clasificadoras mecánicas basadas en este concepto con variantes mínimas entre ellas. Normalmente miden la fuerza necesaria para obtener una deformación establecida en la pieza en ensayo o miden la deformación bajo una carga constante. Además, determinan el módulo de elasticidad a lo largo de la pieza en estudio permitiendo conocer el o los puntos débiles de la misma.

Actualmente estas máquinas están siendo mejoradas por otras que implementan técnicas de escáner, radiaciones, ultrasonidos y técnicas vibratorias (Fernández-Golfín *et al.*, 2001). Estas nuevas máquinas permiten conocer un número elevado de propiedades del material de una sola vez, tales como nudosidad, humedad, densidad, módulo de elasticidad dinámico, entre otras; sin embargo, su precio es elevado por lo que suele ser empleada en aserraderos de gran tamaño que son capaces de amortizar el coste de este tipo de maquinaria.

En España hay una clasificadora mecánica automática del tipo Cook-Bolinder en el Laboratorio de Estructuras de Madera del CIFOR-INIA (Figura 5b).

Inteligencia artificial:

Esta técnica conjuga la adquisición automática de parámetros no destructivos y su posterior análisis mediante un sistema informático. Los valores registrados en el sistema informático son analizados por un algoritmo que permite valorar la calidad del material. Para ello es necesario que con un primer conjunto de datos el sistema “aprenda” a clasificar las piezas. Una vez “entrenado” el sistema, se le suministran nuevos datos sin la conclusión calculada por el equipo de investigadores y se le pregunta su clasificación. El sistema responde con un porcentaje de aciertos superior al 95% y con una leve pero significativa tendencia a sobreestimar la calidad.

Un esbozo interesante de esta técnica puede consultarse en un trabajo predoctoral (Mier, 2001) realizado en INIA y defendido en la Escuela de Montes de la UPM y en una comparativa de la eficiencia frente a otras técnicas (Mier *et al.*, 2005)

RESULTADOS

Para la redacción de este capítulo hemos partido del análisis de más de un centenar de documentos publicados entre 1988 y 2008. Dadas las lógicas limitaciones de espacio y tiempo, la parte ardua del trabajo ha sido la elección de las citas más relevantes. En la elección se han preferido las tesis y trabajos de postgrado (que a su vez incluyen amplias revisiones bibliográficas) y alguna revisión anterior. En artículos y comunicaciones a congresos se ha preferido los publicados fuera de España.

Técnica de evaluación visual

En España se utilizó la clasificación visual procedente de otros países europeos (británica: BS, alemana: DIN), en tanto se elaboraban las normas españolas de clasificación visual (UNE 56544 y UNE 56546). Una buena descripción de la norma española de clasificación de coníferas, que ha sufrido diversas revisiones, se encuentra en un manual de clasificación de madera (Fernández-Golfín *et al.*, 2003).

También se presentó un libro sobre las características del *Pinus radiata* (López de Roma *et al.*, 1988) y acaso como consecuencia del hito anterior se incluyó un pequeño capítulo sobre las características mecánicas de las calidades visuales.

Con mayor rigor, y ahora sobre *Pinus pinaster*, Ortiz *et al.* (1989), Ortiz y Martínez (1991) y Martínez (1992), muestran los valores mecánicos obtenidos en los ensayos destructivos a flexión según la norma ISO 8375 para diferentes calidades visuales.

Referido a *Pinus sylvestris*, un trabajo doctoral de Hermoso (2001) efectúa una recopilación de muestreos de campo y ensayos de laboratorio que se utilizaron en la homologación de la madera de origen español en el marco normativo de la UE. Con la misma filosofía Conde (2003) desarrolla un proceso similar para *Pinus nigra*.

Las investigaciones realizadas sobre estas coníferas permitieron la elaboración de la normativa visual (UNE 56544) en la que se definieron dos calidades para el uso estructural: ME-1 y ME-2 (ME: material estructural). Además se pudo asignar a la combinación de especie y calidad visual, la clase resistente acorde con lo dispuesto en la normativa europea (EN 338 y EN 384). Estas asignaciones se presentaron en el Comité de Normalización Europeo (CEN), que una vez examinadas, las aprueba e incluye en la norma EN 1912.

Una vez “dominada” y normalizada la técnica de evaluación visual, los trabajos doctorales más recientes se han centrado en la evaluación y modificación de los criterios conservadores de la norma visual. En estos trabajos destaca la aplicación de la clasificación visual sobre madera de derribo (Esteban, 2003), dónde se incide en la presencia, tamaño y posición de las fendas en este tipo de madera. Posteriormente con base en los resultados de los ensayos sobre madera de gran escuadría (Íñiguez, 2007), se crea la calidad MEG (madera estructural gran escuadría) y se proponen modificaciones de los criterios de la norma visual. Dicha clasificación y modificaciones están en el proceso de incluirse en la normativa europea.

La especie *Eucalyptus globulus* ha sido igualmente sometida a homologación tras la presentación de resultados en un congreso iberoamericano (Fernández-Golfín *et al.*, 2007a) y ha dado lugar a la norma de clasificación visual de frondosas UNE 56546 y a su inclusión en la norma EN 1912.

Es preciso citar también otros trabajos de caracterización realizados sobre abeto (*Abies alba*) por la Universidad de Lérida (Badia, 1999); la caracterización de madera en rollo de coníferas por parte del CIFOR-INIA (Fernández-Golfín *et al.*, 2007b; Sáenz, 2008) y sobre *Juniperus thuriphora* (Díez *et al.*, 2006) por parte de CESEFOR, VALONSADERO e INIA.

Probablemente se continuará con la caracterización de *Castanea sativa*, *Quercus* sp. e híbridos de *Populus* sp., si nuestros proyectos tienen receptividad entre los proveedores de fondos para la investigación. En estos momentos se está solicitando financiación para un trabajo similar sobre la madera de álamo (*Populus* sp.), la cual ocupa una gran superficie de repoblación y alcanza tamaños estructurales a los 15 años de su plantación.

En el caso de las coníferas ha sido probado en todos los estudios que la norma visual es excesivamente conservadora (Carballo *et al.*, 2007b), por ello en estos momentos los trabajos se enfocan en disminuir la cantidad de material subestimado por la normativa visual. Como

consecuencia de estos trabajos, se plantea la posibilidad de modificar los límites de ciertos criterios (Díez *et al*, 2000; Adell *et al*, 2008).

En la actualidad, son pocos los aserraderos que venden madera clasificada visualmente de pinos cortados en España. La clasificación visual también se ha utilizado en peritaciones de estructuras para estimar el valor resistente de los elementos estructurales.

La utilización de la clasificación visual en un aserradero tiene su mayor inconveniente en la cantidad de material que se rechaza, y en consecuencia no se puede vender como material estructural. Sin embargo el mercado CE obligará a los productores de madera estructural a clasificar la madera por algún método reconocido en la normativa europea.

Contenido de humedad

La medida del contenido de humedad de la madera es imprescindible para una adecuada utilización del material. Sin embargo, la determinación del contenido de humedad se enfrenta a numerosas dificultades debido a la singular estructura de la madera. En una misma viga existen variaciones de humedad entre distintos puntos de la sección, cuanto más alejados del exterior de la sección, mayor será el contenido de humedad. Además, este comportamiento diferencial es distinto para cada especie, lo que dificulta el conocimiento y la aplicación práctica de los resultados de investigación.

La manera de minimizar las dificultades que tiene la madera respecto al contenido de humedad se basa en el correcto secado del material. En este sentido se escribió un manual sobre secado de la madera donde se explican las técnicas y consideraciones a tener en cuenta (Fernández-Golfín y Conde, 2007).

En Europa existe una norma que especifica cómo se debe medir la madera, UNE-EN 13183, donde describe el procedimiento y equipos que se deben utilizar, pero hay otras seis normas que se pueden utilizar en función del tipo de control que se desee usar. Una buena explicación del entramado normativo se puede encontrar dentro de la página de la acción COST-E53 (Esping, 2007).

Ultrasonidos

Junto con la clasificación visual, ésta es la técnica más ampliamente utilizada por los grupos españoles. A la vez, sus resultados no acaban de cumplir las expectativas creadas. En la Tabla 1 se pueden observar los modelos utilizados en España en las investigaciones realizadas desde los años noventa. En ella se puede comprobar que la predicción de la elasticidad (MOE) o la resistencia (MOR) a partir de variables no destructivas explica entre el 40% al 70% de las propiedades mecánicas. Se puede afirmar que la estimación del módulo de elasticidad es más precisa que la del módulo de rotura y entre los predictores, el módulo de elasticidad dinámico (MOE_{din}) que contiene información sobre la densidad, es un estimador más preciso que la velocidad de la onda.

Cuadro 1. Resultados y modelos obtenidos con la técnica de ultrasonidos.

Especie	Variables	N	Modelos	R ²	Autor
<i>P. nigra</i>	MOE- V_{ultra}	735	MOE= -11303,39+0,000500587* V_{ultra}^2	51%	Conde, 2003
<i>P. nigra</i>	MOE- V_{ultra}	854	MOE= (-11,0191+0,0234825* V_{ultra}) ²	51%	Hermoso <i>et al</i> , 2002
<i>P. nigra</i>	MOE- V_{ultra}	120	MOE= -9420,57+4,19* V_{ultra}	53%	Íñiguez, 2007
<i>P. pinaster</i>	MOE- MOE_{din}	505	MOE= 11778,6+0,634028* MOE_{din}	45%	Martínez, 1992
<i>P. pinaster</i>	MOE- MOE_{din}	172	MOE= 5712,49+0,670654* MOE_{din}	53%	Martínez, 1992
<i>P. nigra</i>	MOE- MOE_{din}	120	MOE= 330,4+0,7548* MOE_{din}	74%	Íñiguez, 2007
<i>P. sylvestris</i>	MOR- V_{ultra}	85	MOR = -94,9877+0,0263233* V_{ultra}	34%	Hermoso, 2001
<i>P. nigra</i>	MOR- V_{ultra}	854	MOR= -114,475+0,0333672* V_{ultra}	40%	Hermoso <i>et al</i> , 2002
<i>P. nigra</i>	MOR- V_{ultra}	120	MOR= -48,52+0,019* V_{ultra}	50%	Íñiguez, 2007
<i>P. sylvestris</i>	MOR- MOE_{din}	85	MOR= 5,50514+0,00351851* MOE_{din}	38%	Hermoso, 2001
<i>P. nigra</i>	MOR- MOE_{din}	120	MOR= -3.65+0.0034* MOE_{din}	60%	Íñiguez, 2007

MOE: módulo de elasticidad estático en flexión. MOR: módulo de rotura. V_{ultra} : velocidad medida con ultrasonidos. MOE_{din} : módulo de elasticidad dinámico.

A pesar de los estudios realizados hasta el momento no existe ninguna norma o protocolo a seguir de manera estricta cuando se usa esta técnica. Además los equipos permiten hacer lecturas situando los transductores a diferentes distancias y ángulos respecto a la fibra de la madera (Acuña *et al*, 2005 y 2007), lo cual dificulta la comparación de ciertos resultados.

La técnica tiene múltiples aplicaciones potenciales que abarcan desde el árbol en pie hasta cualquier elemento estructural en servicio. Sin embargo, en España la investigación se ha centrado en ensayos de laboratorio con medidas directas e indirectas sobre las coníferas de uso estructural de procedencia española, con el objetivo de clasificar el material o conocer un valor de referencia para la inspección en estructuras (Íñiguez, 2007). En el caso de las inspecciones, las velocidades de ultrasonidos se analizan de manera conjunta con evaluaciones visuales u otras técnicas puntuales para conocer la densidad o el estado interior del material.

Existen datos de investigaciones sobre la velocidad de paso de una onda ultrasónica a través del material, y esta información ha sido publicada en tesis, memorias de proyectos, comunicaciones a congresos y artículos. Sin embargo, los resultados se presentan de manera diferente y en ocasiones no se conoce la desviación estándar del material, o el valor medio de la velocidad de la onda, o el valor de la densidad del material para calcular el módulo de elasticidad. Sería necesario la creación de una base de datos que defina la información mínima necesaria, así los resultados de futuras investigaciones se podrían comparar entre sí.

Por otra parte, apenas existe información sobre la aplicación de la técnica a árboles en pie, troncos y trozas. Esta información existe para algunas especies europeas y se está demostrando que se puede aplicar para homogeneizar la producción desde los cargaderos de madera situados en el monte. Sería deseable que se iniciaran proyectos de colaboración con aserraderos o industrias para que se beneficiaran de los resultados de proyectos de este tipo.

Análisis de vibraciones:

La técnica de análisis de las vibraciones se ha extendido en la investigación española desde los primeros resultados mostrados por Arriaga *et al*. (2005) sobre madera de pino radiata. De igual manera, la técnica es ampliamente utilizada en Europa y es una de las más implementadas en las clasificadoras automáticas de nueva creación.

Cuadro 2. Resultados y modelos obtenidos con la técnica de vibraciones.

Especie	Variables	N	Modelos	R ²	Autor
<i>P. nigra</i>	MOE- V_{vib}	120	MOE=-7033,77+4,26 V_{vib}	52%	Íñiguez, 2007
<i>P. radiata</i>	MOE-MOE _{vib}	75	MOE= -337.9+1,1136*MOE _{vi}	77%	Arriaga <i>et al</i> , 2005
<i>P. nigra</i>	MOE-MOE _{vib}	120	MOE= 726.1+0,9599*MOE _{vib}	76%	Íñiguez, 2007
<i>P. sylvestris</i>	MOE-MOE _{vib}	47	MOE= 1152,9+1,04*MOE _{vib}	65%	Casado <i>et al</i> , 2007
<i>P. pinaster</i>	MOE-MOE _{vib}	82	MOE= -867,908+1,00219*MOE _{vib}	82%	Casado <i>et al</i> , 2008
<i>P. nigra</i>	MOR- V_{vib}	120	MOR= -43,74+0,0207* V_{vib}	53%	Íñiguez, 2007
<i>P. radiata</i>	MOR-MOE _{vib}	75	MOR= 0,8147+0,0039*MOE _{vib}	48%	Arriaga <i>et al</i> , 2005
<i>P. nigra</i>	MOR-MOE _{vib}	120	MOR= -3,85+0,0045*MOE _{vib}	65%	Íñiguez, 2007

MOE: módulo de elasticidad estático en flexión. MOR: módulo de rotura. V_{vib} : velocidad medida la frecuencia de resonancia de la vibración longitudinal. MOE_{vib}: módulo de elasticidad dinámico.

Existen diferentes equipos basados en técnicas vibratorias que están aprobados para clasificar madera conforme a la normativa EN 14081. Los valores para clasificar las especies aprovechadas en España no están calculados, sin embargo los resultados recientes (Cuadro 2) son comparables a los obtenidos para especies que se clasifican actualmente con esta técnica.

Al igual que los ultrasonidos, la técnica se puede implementar en equipos portátiles y fijos, y por lo tanto, las aplicaciones pueden abarcar desde el tronco recién cortado hasta el producto

estructural terminado. En estos momentos esta técnica no es utilizada en España pero ya existen proyectos de investigación en otros países que estudian cómo aplicarla a estructuras en servicio (Gülzow *et al*, 2007).

El número de resultados y aplicaciones prácticas estudiadas de esta técnica sobre las especies de madera españolas es escaso hasta el momento, sin embargo, los resultados obtenidos mejoran la metodología de ultrasonidos, pues la relación entre la variable indicadora no destructiva y la destructiva alcanza valores más altos. Al ser comparada con la clasificación visual, la cantidad de material subestimado es escaso, lo cual justifica la necesidad de impulsar esta técnica en la clasificación de madera aserrada (Carballo *et al*, 2007a).

Al igual que en el campo de ultrasonidos existe una línea de investigación referente a la preclasificación, aún en sus inicios, para la madera extraída en España.

Clasificadoras mecánicas automáticas

Con la máquina Cook-Bolinder descrita en el apartado 2.2 se han calculado los modelos de ajuste para clasificar la madera de *Pinus sylvestris* (Hermoso, 2001) y *Pinus nigra* (Conde, 2003) según la normativa europea. Dichos ajustes están recogidos en la norma EN 14081-4 junto con los de otras especies europeas y para una gran variedad de equipos.

Recientemente también se han presentado valores de ajuste de la máquina Cook-Bolinder para *Pinus pinaster*, con base en una muestra de 490 vigas estructurales con diferentes secciones (Carballo *et al*, 2008). Sin embargo, estos resultados aún no están homologados dentro de la norma europea EN 14081-4.

Los resultados obtenidos permiten la clasificación del material y la comercialización del producto en el mercado de la Unión Europea (UE). Sin embargo, el volumen de madera aserrada de origen español comercializado con destino estructural no es muy elevado, por lo que en estos momentos, ningún aserradero español invierte en este tipo de clasificadoras. Como consecuencia, las líneas futuras en este campo deberían enfocarse a la producción de equipos clasificadores más económicos y versátiles, y posteriormente, realizar los ensayos necesarios para su calibración a las especies aprovechadas en España.

Densitómetros

Resistógrafo:

El trabajo de mayor profundidad sobre este equipo está expuesto en una tesis doctoral (Capuz, 2003), en el cual se demuestra que la técnica es capaz de “acertar” a discriminar las calidades visuales obtenidas previamente por la UNE 56544; obtiene buenas predicciones de la densidad ($R^2 > 60\%$) en madera libre de defectos y que no es peor que la técnica de ultrasonidos.

Además, presenta una aplicación práctica sobre piezas estructurales de un edificio ganadero con resultados aceptables. Este buen resultado refuerza el entusiasmo del autor acerca de la utilidad en inspección de estructuras, aunque señalando, como era de esperar, la necesidad de utilizar todo el conjunto de las técnicas aquí expuestas para un diagnóstico adecuado.

Penetrómetro y arranque de tornillos:

Ambas técnicas suelen usarse en trabajos de inspección de estructuras para estimar la densidad, habitualmente acompañando a otros ensayos no destructivos. En una de las últimas investigaciones se presenta una comparación sobre la calidad de las estimas de la densidad y del módulo de elasticidad (Bobadilla *et al*, 2007). Los materiales utilizados han sido vigas de pino, tanto recién apeadas como procedentes de viejos edificios, de las especies radiata, silvestre y nigra.

Los autores se decantan por la mejor predicción obtenida por arranque de tornillo pero sin sobrepasar nunca coeficientes de determinación del 50%. Como era de esperar, se propone la utilización de estas artes acompañando a otras técnicas no destructivas en coincidencia con trabajos de inspección de otros autores (Basterra *et al*, 2005a y 2005b). Otros documentos interesantes y con especial énfasis en el arranque de tornillos son los de Basterra *et al* (2006) y Casado *et al* (2005).

También hay resultados sobre estos equipos en la tesis de Iñiguez (2007) con unas predicciones de la densidad obtenidas por medio de una regresión lineal con un coeficiente de determinación del 71%; lo cual supera las anteriores investigaciones.

Georradar:

Los trabajos que se refieren en este apartado son desarrollados esencialmente en un grupo de investigación de la UP de Valencia y tienen su origen en dos tesis doctorales (García, 1997 y Pérez, 2001) que revisan ampliamente la utilización de esta técnica en ingeniería civil, arqueología y patrimonio histórico-artístico.

Dada la importancia de la madera en el citado patrimonio, se derivó su uso hacia la utilización del georradar en madera. Como primer paso se realizó una comparación inicial (Capuz, 2003) con técnicas ya manejadas previamente (ultrasonidos, resistógrafo, etc.), para continuar con estudios específicos de algunas propiedades concretas de la madera (Rodríguez *et al*, 2007a, 2007b y 2008) tales como la humedad o la detección de nudos (variaciones en la densidad).

Aún con las debidas reservas dado el tamaño de muestra y el grado de desarrollo de la técnica sobre madera, se presentan resultados interesantes en los estudios citados. Así el módulo de elasticidad se relaciona linealmente con los máximos de onda con mejor precisión que el resistógrafo, pues alcanza coeficientes de determinación (R^2) mayores y con razonablemente buena ortogonalidad entre ambas predictoras.

Para la determinación del contenido de humedad por medio de la constante dieléctrica del GPR se obtienen coeficientes de determinación superiores a 90% utilizando modelos de regresión del tipo $y = a + b_1x + b_2x^2 + b_3x^3$.

Recientemente se ha elaborado una tesis doctoral (Rodríguez, 2009) que recopila un cuerpo de doctrina suficiente para permitir la utilización de esta técnica en la inspección y diagnóstico de estructuras en madera.

En opinión de uno de los autores de este texto (e implicado en la técnica), el GPR puede resultar tan útil en madera como en el resto de los campos donde se utiliza habitualmente.

Aplicaciones reales de los resultados anteriores

La aplicación conjunta de todo lo expuesto en los párrafos anteriores puede consultarse en el estudio previo a la rehabilitación de la plaza mayor de Chinchón-Madrid-España (Basterra *et al*, 2005a) y refiriendo a propuestas metodológicas formales en donde se describe de forma exhaustiva un protocolo de actuación (Basterra *et al*, 2005b). En forma de comunicación a congreso (Capuz *et al*, 2007) se resume la utilización de diversas de estas técnicas en La Lonja de los Mercaderes (Valencia-España). Con autores hispano-lusos debe citarse a Botelho *et al*, (2006) sobre el mismo edificio valenciano.

CONCLUSIONES

En opinión de los autores, la investigación realizada en España tiene una calidad razonable. La gran línea de caracterización no destructiva de especies presenta resultados satisfactorios y está prevista la ampliación del elenco de maderas utilizadas en España. Las nuevas caracterizaciones se harán según normas UE para conseguir el reconocimiento de los

resultados a nivel europeo. Sin embargo se detectan varias debilidades. En primer lugar, los resultados se publican en actas de congresos y publicaciones científicas, por lo que en algunos casos, no llegan fácilmente a los usuarios.

En segundo lugar, la industria maderera no utiliza los avances realizados en el laboratorio, posiblemente por desconocimiento o por limitantes económicas. La primera va ligada a la razón expuesta en el párrafo anterior, pues la escasa difusión en medios de divulgación de los resultados de investigación no favorece su uso. En términos coloquiales carecemos de un servicio "comercial", que explique las aplicaciones que la investigación tiene en la industria. Desde el punto de vista económico, quizás las empresas no vean la ventaja de invertir dinero en técnicas no destructivas, pues no genera beneficio o ventaja competitiva a corto plazo. Además la sociedad no está dispuesta a pagar más por un producto clasificado, en parte por el desconocimiento generalizado que existe. Hasta el momento, sólo en el campo de la inspección de estructuras se han utilizado las técnicas no destructivas, dónde su uso se ha incrementado notablemente en los últimos años.

En tercer lugar los nuevos resultados con técnicas de ultrasonidos y vibración no han sido presentados para su inclusión en la normativa europea. Sin embargo, la homologación de los resultados en la normativa europea no garantiza la utilización de equipos, pues es cada industria la que decide si invierte en equipos no destructivos. Por ello, antes de realizar un esfuerzo de investigación se debería contar con la complicidad de la industria para decidir sobre qué especies sería beneficioso el desarrollo normativo.

BIBLIOGRAFÍA

- Acuña L; Díez MR; Casado M. 2006. Los ultrasonidos y la calidad de la madera estructural. Aplicación a *Pinus pinaster* Ait. Boletín Informativo del CIDEU 2:7-26. (ISSN: 1885-5237).
- Acuña L; Díez MR; Martín L; Casado, M; Basterra A; Ramón, G; Relea, E. 2007. La técnica de transmisión ultrasónica aplicada a la madera estructural. *In* Congreso Nacional de Ensayos No destructivos (11, 2007, Gijón, ES). Actas del Congreso. 11 p. (Disponible además en <http://www.iea.uva.es/maderas/Files/2007%20Ultrasonidos-AEND%20Gij%C3%B3n.pdf>)
- Adell F, Hermoso; E; Arriaga F; Richter. 2008. Comparison of the Spanish visual strength grading Standard for structural sawn timber (UNE 56544) with the German one (DIN 4074) for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) from Germany. *Holz als Roh und Werkstoff*. 241 p. (Normas).
- Arriaga F; G; Íñiguez, G.; Esteban, M. 2005. Assessment of strength and stiffness properties using longitudinal stress wave on structural gross cross section timber of radiata pine (*Pinus radiata* D. Don). *In* Proceedings of International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, (14th. 2005, S.L.). Proceedings. S.L., S.E. p. 101-109.
- Badia, M. 1999. Caracterización mecánica de la madera de abeto (*Abies alba* Mill.) a partir de ensayos con probetas de tamaño estructural. Proyecto final de Carrera. Lleida, ES, Universidad de Lleida, ETSEA. S.p.
- Basterra, A; López, G; Acuña, L; Casado, M; Ramón, G. 2005a. Inspección, diagnóstico, análisis estructural y propuesta de intervención en la estructura de madera vista de la plaza mayor de Chinchón (Madrid). Comunidad de Madrid, ES, Dirección General de Patrimonio Histórico. S.p.

- Basterra, LA; Acuña, L; Casado, M; Ramón, G; Relea, E; Barranco, I; López, G. 2005b. Análisis de las técnicas de diagnóstico de madera estructural en edificios existentes y propuesta de integración orientada al proyecto. *Jornadas de Investigación en construcción*. ES, S.E. p.165-182. (ISBN: 84-931709-4-1).
- Basterra, LA; Casado, M; Acuña, L; Pinazo, O. 2006. Techniques of pseudo–non destructive testing on structural wood, by extraction of screws. *Revista RECO PAR* No. 2:37-59.
- Bobadilla, I; Esteban, M; Iñiguez, G; Arriaga, F; Ballarín, D; Palacios, J. 2007. Estimación de la densidad de la madera aserrada de conífera mediante técnicas no destructivas de arranque de tornillos y penetrómetro y su aplicación en la estimación del módulo de elasticidad. *Informes de la Construcción* 59:107-116.
- Botelho J; Capuz, R; Díez, R; Faria, J. 2006. Avaliação da capacidade resistente de estruturas de madeira com recurso a ensayos in situ. *In* *Encontro sobre Patologia e Reabilitação de Edifícios*, (2º, 2006, Porto, PT). Actas del Congreso. Porto, PT, PATORREB2006. S.p. (ISBN 972-752-08).
- Capuz, R. 2003. Métodos de ensayos no destructivos para la estimación de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas. Tesis doctoral. Valencia, ES, Universidad Politécnica. S.p.
- Capuz Lladró, R.; Díez Barra, R; Botelho, J; San Valero, E. 2007. Aplicación de métodos de ensayo no destructivos a vigas del forjado del Consulado del Mar de la Lonja de los Mercaderes de Valencia. *In* *Congreso Iberoamericano de Productos Forestales*, (3r, 2007, Buenos Aires, AR). Actas del Congreso. Buenos Aires, AR, S.E. S.p.
- Carballo, J; Hermoso, E; Fernández-Golfín, JI; Cabrero, JC. 2007a. Evaluación de técnicas vibratorias en la clasificación de la madera aserrada destinada a fines estructurales. *In* *Congreso Español de Ensayos No Destructivos*, (11, 2007, ES). Actas. ES, S.E. p. 305-316.
- Carballo, J; Hermoso, E; Fernández-Golfín, JI; Cabrero, JC. 2007b. Evaluación de sucesivas versiones de la norma de clasificación visual UNE 56544 sobre madera aserrada de Pino radiata. *In* *Congreso Ibérico*, (1, 2007, Albacete, ES) y *Congreso Nacional de Agroingeniería*, (4, Albacete, 2007, ES). Actas. ES, S.E. p 304-311.
- Carballo, J; Hermoso, E; Fernández-Golfín, JI. 2008. Machine grading and control of structural timber in *Pinus pinaster* Ait. *In* *Taller Latinoamericano de técnicas no destructivas para productos de madera* (2do. 2008, S.L.). Actas del Congreso. ES, S.E. S.p.
- Casado, M; Pinazo, O; Basterra, LA; Acuña, L. 2005. Técnicas de ensayo no destructivas en madera estructural mediante el extractor de tornillos. Aplicación en viguetas de forjado de un edificio singular. *In* *Congreso Nacional de Protección de la Madera*, (4, 2005, ES). Actas el Congreso. ES, S.E. S.p.
- Casado, M; Acuña, L; Basterra, LA.; Vecilla, D; Relea, E; Pando, V. 2007. Determinación de la capacidad resistente de madera estructural de *Pinus sylvestris* mediante PLG. Técnicas END. ES, Asociación Española de Ensayos No Destructivos. p. 233-242.
- Casado, M; Acuña, L; Basterra, LA; Relea, E. 2008. Clasificación de madera estructural de *Pinus pinaster* mediante técnicas vibratorias. *In* *Jornadas de Investigación en Construcción*, (2do. 2008, Madrid. ES). Actas. ES, S.E. S.p.
- Conde García, M. 2003. Caracterización de la madera estructural de *Pinus nigra* Arn. Tesis doctoral. Madrid, ES, Universidad Politécnica. S.p.
- Díez, M; Conde, M; Fernández-Golfín Seco, JI; Roskopf, S. 2000. Clasificación visual de madera estructural de pino laricio: Comparación de resultados usando las normas UNE 56544 y DIN 4074. *Revista Inv. Agraria* 9(2):375-380.

- Díez, R; Cabrero, JC; García, R. 2006. Caracterización de la sabina albar con piezas de tamaño casi estructural. *In* Reunión sobre sabinas y enebrales, (1ª, 2006, ES). Resúmenes de la Reunión. ES, S.E. S.p.
- EN 13183:2004. Moisture content of a piece of sawn timber - Part 2: Estimation by electrical resistance method. Brussels, BE, Comité Européen de Normalisation. S.p. (Standard).
- EN 14081 parts 1-4:2005. Timber Structures – Strength Graded Timber with rectangular Cross Section. Brussels, BE, Comité Européen de Normalisation. S.p. (Standard).
- EN 1912:2005. Structural timber – Strength classes – Assignment of visual grades and species. Brussels, BE, Comité Européen de Normalisation. S. p. (Standard).
- EN 338:2003. Structural Timber – Strength Classes. Brussels, BE, Comité Européen de Normalisation. S. p. (Standard).
- EN 384:2004. Structural Timber – Determination of characteristic values of mechanical properties and density. Brussels, BE, Comité Européen de Normalisation. S. p. (Standard).
- Esping, B. 2007. Dried Timber- how to specify correctly. COST-E53. (en línea). Consultado 14, nov., 2008. Disponible en <http://www.coste53.net/downloads/WG2/WG2-Riga/Lectures/Riga2007-Esping.pdf>
- 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. Madrid, ES, Universidad Politécnica. S.p.
- Esteban, M; Argüelles, R; Arriaga, F; Iñiguez, G; Bobadilla, I. 2007. Estado actual de la investigación sobre madera estructural en España. Informes de la Construcción 59: 15-27.
- Fernández-Golfín, JI; Díez, MR; Gutiérrez, A. 1998. Caracterización mecánica de la madera aserrada de uso estructural clasificada visualmente de acuerdo con la norma UNE 56544. Materiales de Construcción 48(252):45-59.
- Fernández-Golfín, JI; Díez, R; Hermoso, E. 2001. Análisis y estado del arte de la técnica de clasificación mecánica por máquina de la madera aserrada estructural. Rev. Investigación Agraria 10(1):5-19.
- Fernández-Golfín, JI; Díez, R; Hermoso, E; Mier, R. 2003. Manual de clasificación de madera. Ciudad, ES, AITIM. S. p. (ISBN 84-87381-26-X).
- Fernández-Golfín, JI; Díez, R; Hermoso, E; Baso, C; Casas, JM; González, O. 2007a. Caracterización de la madera de *Eucalyptus globulus* para uso estructural. Boletín del CIDEU 4:91-100.
- Fernández-Golfín, JI; Díez, R; Hermoso, E; Mier, R. 2007b. Mechanical characterization of visually classified small-diameter lario pine round timber. Spanish Journal of Agricultural Research 5:304-311.
- Fernández-Golfín JI; Conde, M. 2007. Manual técnico de secado de maderas. Madrid, ES, Asociación de Investigación, Técnica de las Industrias de la Madera y Corcho (AITIM). 256 p.
- García, F. 1997. Aplicaciones de la técnica geofísica de prospección en ingeniería civil y glaciología. Tesis doctoral. Barcelona, ES, Universidad Politécnica de Cataluña. S.p.
- Gülzow, A; Steiger, R; Gsell, D; Wilson, W; Feltrin, G. 2007. Dynamic field performance of a wooden trough bridge. *In* Proceedings of the International Conference on Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures (EVACES'07), (2nd, 2007, Porto, PT). Proceedings. Porto, PT, EVACES'07. p. 181-188.

- Hermoso, E. 2001. Caracterización mecánica de la madera estructural de *Pinus sylvestris* L. Tesis doctoral. Madrid, ES, Universidad Politécnica. S.p.
- Hermoso, E., 2002. Calidad de la madera aserrada mediante evaluación no destructiva con ultrasonidos. **In** Congreso Nacional de la Madera, (2do, 2002, Segovia, ES). Segovia, ES, S.E. S.p.
- Iñiguez, 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. Madrid, ES, Universidad Politécnica. S.p.
- ISO 8375:1985. Solid timber in structural sizes. Determination of some physical and mechanical properties. Geneve, CH, International Standard Organization. S.p. (Standard).
- López de Roma, A. 1988. Propiedades y tecnología de la madera de *Pinus radiata* (Pino Insignis) del País Vasco. Madrid, ES, Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias y Centro Técnico de la Madera del País Vasco, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. 231 p.
- Martínez, JJ., 1992. Características mecánicas de la madera de *Pinus pinaster* Ait. obtenidas a partir de ensayos con piezas de tamaño estructural. Tesis doctoral. Madrid, ES, ETSI Montes, Universidad Politécnica de Madrid. S.p.
- Mier, R. 2001. Clasificación de madera aserrada estructural mediante inteligencia artificial: redes neuronales. Madrid, ES, Postgrado, Universidad Politécnica. S.p.
- Mier, R; García de Ceca, JL; Díez, MR; Fernández-Golfín, JI; Hermoso, E. 2005. Aplicación de redes neuronales a la clasificación de madera estructural. Comparación con otros métodos de clasificación. **In** Congreso Forestal Español, (4, 2005, Zaragoza, ES). Actas. ES, Zaragoza, S.E. S.p.
- Ortiz, J; Díez, MR; Gutierrez, A; Seoane, I. 1989. Stress grading of Radiata pine timber. **In** Pacific Timber Engineering Conference, (2nd, 1989, Auckland, NZ). Proceedings. Auckland, NZ, S.E. Vol. 1:73-77.
- Ortiz, J; Martínez, JJ. 1991. Características mecánicas de la madera de pino gallego, obtenidas a partir de ensayos con piezas de tamaño estructural. Revista AITIM 150:95-101.
- Pérez, V. 2001. Radar del subsuelo. Evaluación en arqueología y en patrimonio histórico-artístico. Tesis doctoral. Barcelona, ES, Universidad Politécnica de Cataluña. S.p.
- Rodríguez, I, Martínez, R, García, F, Capuz, R, Díez, MR; Tort, I. 2007a. Use of ground penetrating radar technique for structural timber grading-comparison analysis of grading methods. **In** Near Surface Geophysics Conference, (13th, 2007, S.L.). Proceedings. S.L., S.E. S.p. (ISBN: 978-90-73781-81-8).
- Rodríguez, I; Martínez, R; García, F; Capuz, R; Díez, MR; Tort, I. 2007b. Use of the ground penetrating radar technique for structural timber grading. Comparison analysis of grading methods. **In** European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, (14th, 2007, S.L.). Proceedings. S.L., S.E. S.p.
- Rodríguez, I, Martínez, R, García, F, Capuz, R, Díez, MR. 2008. A non-destructive method for the evaluation of density and moisture content in sawn timber structures by GPR. **In** International Conference on Ground Penetrating Radar, (12th, 2008, S.L.). Proceedings. S.L., S.E. S.p.
- Rodríguez, I. 2009. Evaluación de la técnica no destructiva del georradar para la inspección, diagnóstico y análisis resistente de la madera. Tesis doctoral. Valencia, ES, Universidad Politécnica de Valencia. S.p.
- Sáenz, C. 2008. Caracterización mecánica de rollizos descortezados de *Pinus nigra* para uso estructural. Postgrado. Valladolid, ES, Universidad de Valladolid. S.p.

UNE 56544:2007. Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas. Madrid, ES, Asociación Española de Normalización y Certificación. S.p. (Norma).

UNE 56546:2007. Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de frondosas. Madrid, ES, Asociación Española de Normalización y Certificación. S.p. (Norma).