



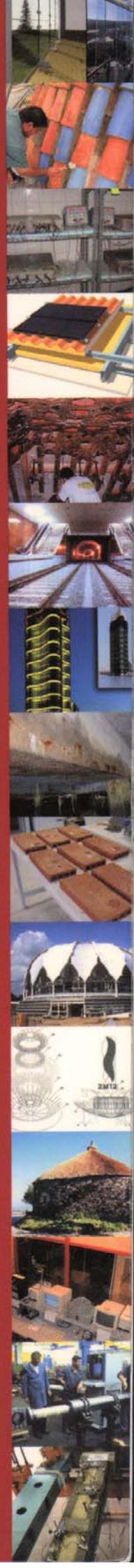
# I JORNADAS DE INVESTIGACIÓN EN CONSTRUCCIÓN



**Actas de las Jornadas**

**TOMO I**

Instituto de Ciencias de la Construcción "Eduardo Torroja"  
Consejo Superior de Investigaciones Científicas



# **Análisis de las técnicas de diagnóstico de madera estructural en edificios existentes y propuesta de integración orientada al proyecto**

## ***Analysis of the structural timber diagnosis techniques at the cultural patrimony with an architectural project orientation***

**Autores:** Gemma Ramón\*. [grcueto@arq.uva.es](mailto:grcueto@arq.uva.es), Alfonso Basterra\*, Milagros Casado\*\*, Luis Acuña\*\*. Grupo de Investigación en Estructuras y Tecnología de la Madera. Universidad de Valladolid  
Avda de Salamanca s/n. 47014 Valladolid. Tlf/fax 983 423 442

\* Arquitectos del Departamento de Construcciones Arquitectónicas, Ingeniería del Terreno y Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras. ETS Arquitectura.

\*\* Ingenieros del Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal. ETS Ing. Agrarias.

### **RESUMEN**

El contenido de esta ponencia forma parte de un proyecto más amplio que pretende desarrollar y poner a punto una metodología para el análisis in situ de la capacidad mecánica residual de barras de estructuras de madera antiguas mediante métodos no destructivos y pseudo-destructivos. Se pretende la integración de técnicas de investigación de ámbitos de conocimiento propios de la ingeniería de montes y la mecánica de la madera, por un lado, y de la ingeniería civil y la arquitectura, por otro. El desarrollo permitirá su aplicación en todos los subsistemas estructurales de madera, desde los más valiosos Bienes declarados de Interés Cultural hasta la gran cantidad de edificaciones urbanas y rurales.

La finalidad es proporcionar a los agentes implicados en el diagnóstico e intervención en el patrimonio procesos y herramientas tecnológicas para la evaluación científicamente fiable de subsistemas estructurales basados en la madera.

*The aim of this project is the development of a methodology for the analysis "in situ" of the residual capacity of old timber bars by non-destructive and pseudo-destructive methods. We intend to integrate research techniques coming from two knowledge areas: wood technology and forest engineering, on one side, and architecture and civil engineering, on the other side. It is fitted in the line of the application of new processes and technologies to the diagnosis of conservation state of the cultural patrimony: real estate and, secondarily, structural parts of personal property.*

*The last purpose is to provide to the agents implied in the diagnosis and intervention in the patrimony processes and technological tools that scientifically allow the trustworthy evaluation of structural timber.*

### **1. INTRODUCCIÓN**

Este trabajo repasa las diversas técnicas disponibles para el diagnóstico y evaluación de elementos estructurales de madera históricos, la mayoría conocidas y empleadas en el mundo de la ingeniería de montes para el diagnóstico de la madera viva, pero no

vulgarizada en el ámbito de la restauración arquitectónica por la dificultad de su importación directa a la madera puesta en obra, ordenando una propuesta de análisis de datos, que facilite la toma de decisiones de intervención.

El objetivo principal es desarrollar y poner a punto una sistemática normalizada de inspección y análisis de piezas estructurales de madera parcialmente degradadas mediante el empleo de métodos no destructivos y quasi-no destructivos, susceptibles de ser aplicados mayoritariamente in situ y que permita evaluar su capacidad residual. El proyecto contempla la validación de los resultados de dichas técnicas y los obtenidos mediante ensayos destructivos, hasta la rotura. Su condición de **metodología orientada al proyecto** facilitaría un procedimiento contrastado para el establecimiento de criterios y propuestas de intervención homogéneas y comparables para una extensa población de casos que se caracterizan, precisamente, por su diversidad en términos tipológicos, materiales, patológicos, etc.

El proyecto forma parte de una línea de investigación más amplia llevada a cabo por un Grupo de Investigación multidisciplinar de la Universidad de Valladolid (<http://www.uva.es/maderas/>), integrado por profesionales e investigadores con experiencia en los campos de la construcción y restauración arquitectónica y la tecnología de la madera: arquitectos e ingenieros de montes, respectivamente. Está siendo financiado por el Ministerio de Fomento en el marco de las Acciones Estratégicas sobre "Mantenimiento y evaluación de estado de obras y edificios" del Área Sectorial "Construcción Civil y Conservación del Patrimonio Histórico Cultural" del Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica 2000-2003".

## 2. ESTADO DE LA CUESTIÓN

El problema de la determinación de la fiabilidad estructural de construcciones de madera existentes ha sido afrontado a lo largo de la historia basándose, fundamentalmente, en la realización de inspecciones visuales y rudimentarios ensayos de impacto de tipo artesanal, cuyo resultado se evaluaba sobre la base de un expertizaje de carácter empírico. Estos métodos, si bien pueden considerarse incompatibles con la metodología científica actual, han demostrado ser de una aceptable eficacia técnico-económica, hasta el punto de que aún en algunos puntos de Europa se conserva el *derecho gremial* de determinados especialistas a ser los únicos autorizados para la inspección de estructuras de madera existentes.

### 2.1. Capacidad portante de la madera

Existen muy pocas referencias a especificaciones de calidad de la madera, salvo algunas reducciones de la resistencia respecto a la madera libre de defectos. Es interesante conocer el enfoque del problema en el pasado y cómo los planteamientos, a veces erróneos, se ajustan a una práctica con un resultado de seguridad similar al actual.

En el **Tratado de Arquitectura Civil** de Benito Bails de 1783<sup>1</sup>, se manejan tensiones admisibles a flexión del orden de los 10 N/mm<sup>2</sup> <sup>2</sup>. Los ingenieros daban tensiones dobles a las reales y con factores de reducción de la resistencia obtenida en ensayos que incluyen ciertas referencias a la calidad de la madera, como la desviación de la fibra, su procedencia y variabilidad, así como la duración de la carga estudiado por Buffon en 1741<sup>3</sup>. En la **Enciclopedia Roret**<sup>4</sup> se incluyen algunos valores de la resistencia de la madera así como

de los módulos de elasticidad. Como valores admisibles adopta una reducción a la quinta parte de valores adoptados para la tensión de rotura a flexión de las distintas especies. Se incluyen ciertos márgenes de seguridad en las tensiones de trabajo que se pueden admitir para diferentes especies de madera con diversos esbelteces.

Para los cálculos de la resistencia y deformación por flexión se utiliza la regla de Barlow que define dos constantes para cada especie. La constante para la determinación de la capacidad resistente a flexión es una sexta parte de la tensión de rotura a flexión. La constante para el cálculo de deformaciones está relacionada con el módulo de elasticidad siendo para vigas biapoyadas, cuatro veces el módulo de elasticidad. También trata de la resistencia de piezas comprimidas incluyendo una expresión de la carga de pandeo en la que vuelve a introducir la constante de Barlow para la deformación. Recomienda que la carga obtenida por cálculo sea reducida a la tercera parte con el fin de que el esfuerzo sea soportado sin ninguna fatiga. Cita las recomendaciones de Rondelet sobre no superar una altura de 10 veces el diámetro de la base y no superar la tensión de compresión de 5 N/mm<sup>2</sup>.

Especie	Resistencia a flexión N/mm <sup>2</sup>	Densidad de referencia Kg/mm <sup>3</sup>	Módulo de elasticidad N/mm <sup>2</sup>
Roble	70,2	934	12.000
Olmo	42,6	553	9.700
Fresno	85,2	760	11.200
Haya	65,4	695	9.300
Pino de Riga	45,6	745	15.000
Abeto pesado	69,0	660	13.000
Alerce	42,0	543	9.000

Tabla 1. Tensión de rotura a flexión deducida de la regla de Barlow y densidad de referencia. Módulo de elasticidad de algunas especies según la Enciclopedia Roret.

En el **Tratado de industria de López**<sup>5</sup> se dan valores de la resistencia a tracción, compresión y flexión de rotura y de trabajo o tensiones admisibles para diversas especies de madera, en principio para una duración permanente de la carga ya que no se hace referencia a la duración. La relación entre tensión de rotura y de trabajo es de 10.

Madera	Tracción paralela N/mm <sup>2</sup>		Compresión paralela N/mm <sup>2</sup>	
	Tensión de rotura	Tensión admisible	Tensión de rotura	Tensión admisible
Encina	70 a 90	7 a 9	38 a 40	3,8 a 4
Roble	60 a 80	6 a 8	30 a 40	3 a 4
Castaño	60 a 130	6 a 13	52	5,2
Olmo	100	10	70	7
Haya	80 a 90	8 a 9	54 a 65	5,4 a 6,5
Álamo negro	90 a 100	9 a 10	70	7
Pino	70 a 90	7 a 10	38 a 60	3,8 a 6

Tabla 2. Tensión de rotura y admisibles de tracción y compresión según López (1885).

## 2.2. Factores que influyen en las propiedades elastomecánicas.

En la literatura técnica está plenamente asentado que los factores que influyen más significativamente en el valor de las propiedades elastomecánicas de la madera son el contenido de humedad, la duración de la carga y la calidad y especie de la madera.

Al aumentar el contenido de humedad disminuyen la resistencia y el módulo de elasticidad; dependencia que tiene lugar para humedades inferiores al punto de saturación de las fibras. Por encima de este valor el agua se encuentra libre, rellenando las cavidades de las fibras, y ya no influye en las propiedades mecánicas. Por eso, los ensayos que se realizan para determinar las propiedades de la madera se efectúan bajo unas condiciones ambientales normalizadas de temperatura ( $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ ) y humedad relativa ( $65\pm 5\%$ ). En la mayoría de especies, tales condiciones implican un contenido de humedad del 12%. No obstante, la influencia de la humedad es diferente para las diversas propiedades mecánicas e influye en la posibilidad de ataque de xilófagos, especialmente por encima del 18-20%.

La influencia de la duración de la carga se ha constatado mediante diferentes ensayos en los que, ante cargas de duración permanente, se obtienen resistencias que son del orden de un 60% de las deducidas de un ensayo de corta duración (2 a 5 minutos). Se demuestra que la influencia de la duración de la carga depende de la calidad de la madera y es significativamente menor en calidades bajas que en altas. En el Eurocódigo 5 se han recogido las experiencias obtenidas sobre la influencia de la duración de la carga en la resistencia de la madera comercial. Por ello los ensayos para la determinación de las propiedades mecánicas se realizan con una duración normalizada, de forma que la rotura se produzca entre 3 y 7 minutos.

También está muy consolidado que la calidad de la madera es el factor de mayor relevancia en su resistencia. Las singularidades del crecimiento del árbol, denominadas vulgarmente “defectos” de la madera (nudos, desviación de la fibra, fendas, acebolladuras, gemas, etc.) suponen una disminución de sus propiedades mecánicas. Para introducir el factor de calidad de la madera en el proceso de análisis y cálculo se recurre a convenciones de clasificación, que toman forma, en cada país, de normativas. Se basan mayoritariamente en la inspección visual, agrupando en un reducido número de calidades las especificaciones relativas a los defectos. Posteriormente, las clases resistentes son asignadas mediante una combinación apropiada de especie y calidad, en un proceso aún no suficientemente consolidado y que abarca un número reducido de especies nacionales comunes.

### **3. TÉCNICAS DE INSPECCIÓN, DIAGNÓSTICO Y ENSAYOS EN MADERA**

Durante los años inmediatamente anteriores y posteriores a la Segunda Guerra Mundial se asistió a un acelerado desarrollo del conocimiento tecnológico de la madera como material estructural. Para conocer su estado y su capacidad resistente residual, en estado parcialmente degradado, existen diversos tipos de análisis, a saber:

- Métodos destructivos (ensayo hasta rotura de piezas<sup>6</sup>, extracción de probetas, etc.)
- Métodos quasi no destructivos (escucha del impacto, medición de la resistencia a la penetración del taladro, medición de la fuerza de arranque de tornillos, medición de la resistencia superficial al impacto puntual, etc.)
- Métodos no destructivos sónicos y ultrasónicos (basados en diversos modos de análisis de la velocidad de propagación y el espectro de ondas de diferentes frecuencias).
- Otros (medida directa de la deformación, propiedades eléctricas, radiaciones, etc.)

Los análisis destructivos de la madera son los que normalmente suelen ser utilizados en laboratorio para determinar las características mecánicas de una especie, procedencia, etc.,

o para determinar el estado de la madera ante el ataque de agentes xilófagos, y consisten en romper la madera para conseguir obtener datos que muestren la capacidad resistente actual de la madera. Como se puede suponer es impropio el utilizar este tipo de análisis para la madera de edificios en pie, dado que lo que se busca es conocer el estado de la madera sin alterar sus propiedades. Por ello la utilización de ensayos quasi no destructivos y no destructivos de la madera son las formas más adecuadas de realizar los análisis. Estas técnicas proporcionan unos datos menos exactos que los de las técnicas destructivas, pero con protocolos y correcciones adecuadas pueden ser lo suficientemente fiables como para conocer el estado de la madera.

3.1. Propuesta de metodología

Como núcleo central del trabajo se ha estructurado una metodología orientada desde la **inspección al proyecto** (Figura 1). Se han establecido tres niveles de análisis (Figura 1).

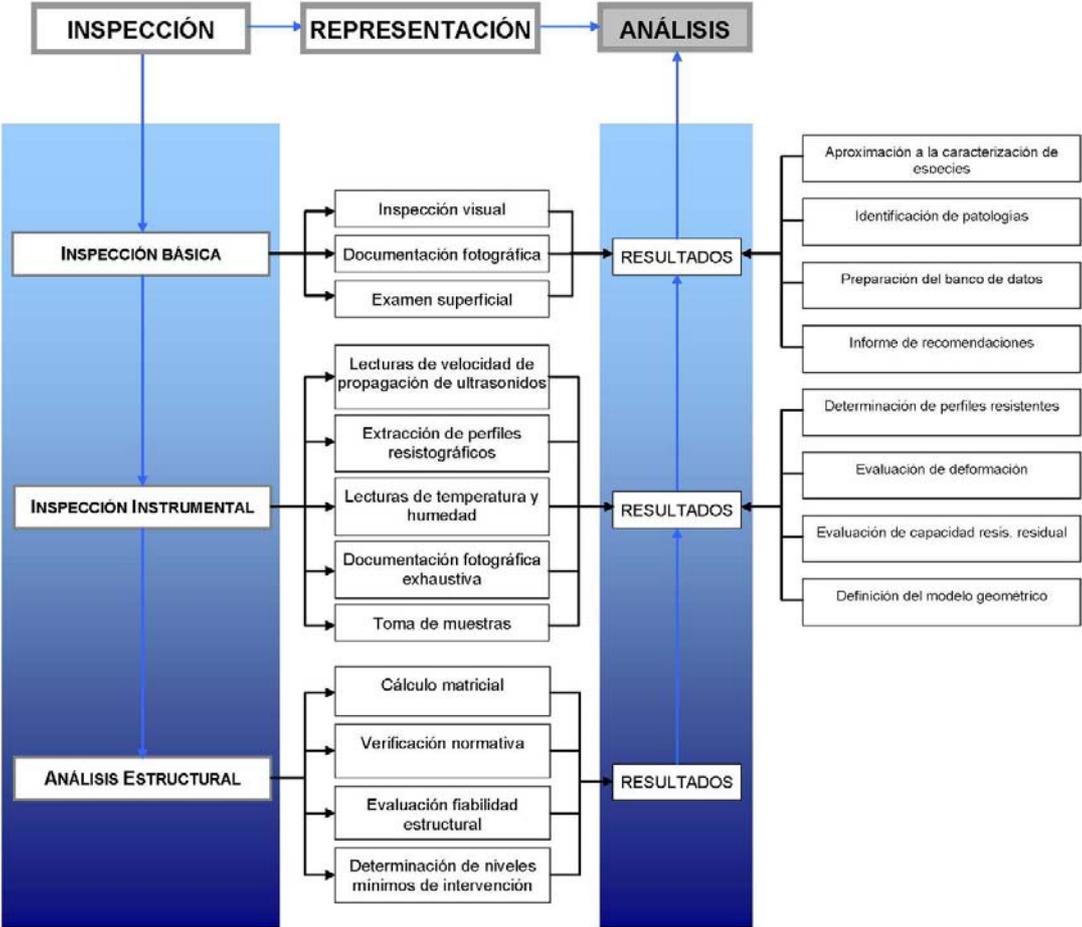


Figura 1 - Niveles de inspección.

El **Nivel Básico** se corresponde con la inspección ocular superficial con la ayuda de herramientas sencillas como el punzón o el martillo de goma, y el apoyo de sistemas gráficos de representación convencional: dibujo y fotografía. Puede obtenerse una razonable aproximación a la especie de que se trata e identificar y localizar familias de patologías por sus signos exteriores, para su incorporación a un sistema de información integrada con los planos que permita establecer criterios y recomendaciones esenciales sobre la estructura. El

**Nivel Instrumental** conlleva la utilización de técnicas específicas del diagnóstico en madera: xilohigrometría, lecturas de propagación de ultrasonidos, medición de la fuerza de arranque de tornillos y obtención de perfiles resistográficos, además de la toma de muestras para la identificación macroscópica y microscópica de la especie. Todo ello complementado con una exhaustiva información fotográfica. Se identifican patologías concretas, con representación gráfica de las zonas o barras afectadas. El nivel más avanzado se alcanza con el **Análisis Estructural** mediante el estudio los datos obtenidos.

El proyecto contempla la posibilidad de realización, en el Laboratorio de Maderas (Figura 2) de la Universidad de Valladolid (Campus “La Yutera”, Palencia), de ensayos destructivos según la norma UNE EN 408, de determinación de las propiedades físico-mecánicas, obteniendo los valores característicos según las indicaciones de la norma UNE EN 384. Se ha desarrollado una aplicación informática para la clasificación visual de la madera (Llorente et al. 2004) con la finalidad de sistematizar la entrada de datos procedentes de la clasificación visual de vigas (norma UNE 56.544), del ensayo de flexión (norma UNE EN 408) y del ensayo por ultrasonido Sylvatest<sup>7</sup>, aplicable a madera de uso estructural para las principales especies de coníferas españolas. El sistema está siendo actualmente experimentado por miembros del grupo de investigación (Acuña, L. et al. 2004) constatándose la eficacia de la utilización de la función de defectos en la predicción del valor de la resistencia a la rotura de las vigas de madera.

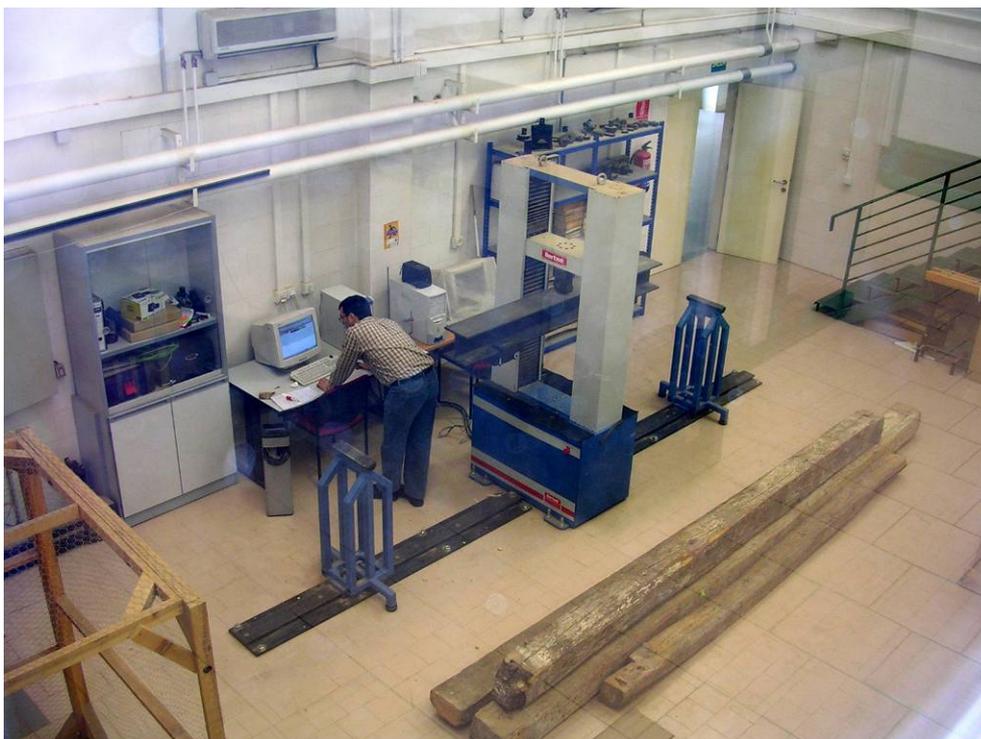


Figura 2 - Laboratorio de Maderas de la Universidad de Valladolid.

### 3.2. Clasificación visual de la madera

La norma española UNE 56544:2003 es de aplicación a la madera de coníferas, por lo que excluye madera de chopo (*Populus* sp.) y eucalipto blanco, pero lo amplía a la madera de pino laricio (*Pinus nigra* Arnold.). Establece las calidades ME-1 (calidad alta) y ME-2 (calidad normal). Cabe destacar que la medición de los nudos se realiza en dirección

perpendicular al eje de la pieza. En cuanto a la madera de gran escuadría no introduce ninguna referencia específica, aunque define las piezas de sección más o menos cuadrada o de baja esbeltez como aquellas cuya relación h/b es menor que 1,5. Este tipo de piezas, asociadas normalmente a grandes escuadrías que incluyen el corazón en su sección, se clasifican considerando los cuatro lados como si fueran caras.

Por su parte, las recomendaciones CEE no han encontrado demasiada implantación y en la actualidad su uso ha sido restringido a trabajos de investigación y a algunos países como Italia. Es aplicable a secciones desde 38 x 63 mm, sin limitación de tamaño, y define tres calidades: S6, S8 y S10.

La mayor parte del conocimiento en lo relativo a la caracterización de la madera estructural mediante la clasificación visual se debe a estudios realizados sobre piezas de pequeña escuadría. Por ello, la aplicación de estas normas en grandes escuadrías puede estar sujeta a la interpretación particular de algunos parámetros de clasificación. Sólo algunas de las normas de clasificación visual permiten distinguir con suficiente definición entre grandes o pequeñas escuadrías. La conclusión general que se puede deducir al respecto es que la información disponible para aplicar las normas actuales, especialmente la norma UNE 56.544, resulta incompleta para obtener resultados prácticos en madera de gran escuadría, tanto por defecto como por exceso.

Se ha deducido (Arriaga et al. 2002) que las líneas propuestas por la norma DIN 4074 son las que aportan unos resultados más ajustados a las características de la madera de gran escuadría. De acuerdo a ella, se puede efectuar la siguiente asignación de clases resistentes:

- Calidad S 13 ..... Clase resistente C18 a C22
- Calidad S 10 ..... Clase resistente C16
- Calidad S7 ..... Clase resistente C14

Esteban (2003) ha trabajado con este tipo de vigas y estudiado una aplicación parcial de la norma española UNE 56.544 basándose exclusivamente en el criterio de nudos y de desviación de la fibra, encontrando regresiones muy aceptables. Ello resulta especialmente recomendable a la vista de la dificultad que presenta la aplicación de algunos de los criterios descartados y la rotundidad con que el criterio de presencia de xilófagos envía al rechazo un gran número de las piezas presentes en estructuras construidas.

El futuro Código Técnico de la Edificación español establece una serie de clases resistentes para la madera de uso estructural, proporcionando criterios de correspondencia entre dichas clases resistentes y las calidades contempladas en diferentes normas internacionales de clasificación visual. Pero, como hemos visto, existirán dificultades evidentes a la hora de aplicar dicha información en la evaluación de estructuras existentes, sobre todo en barras estructurales de grandes escuadrías, de especies y/o variedades y/o prácticas silviculturales y/o procesos industriales no habituales (o inexistentes) actualmente, o barras estructurales de sección circular, características todas ellas frecuentes en el patrimonio histórico.

En definitiva la clasificación visual es una metodología ampliamente experimentada y tiene una utilidad innegable aunque tiende, con carácter más o menos general, a subestimar la calidad estructural de una pieza de los tipos aludidos pudiendo inducir a desestimar la conservación de estructuras perfectamente viables<sup>8</sup>. Por otro lado, la metodología de clasificación visual puede combinarse con otras técnicas complementarias que incrementen su nivel de fiabilidad y precisión, algunas de ellas tratadas a continuación.

### 3.3. Técnicas de inspección y reconocimiento in situ

#### **Inspección visual de la estructura**

La inspección preliminar del edificio con estructura de madera puede realizarse con diferentes niveles de intensidad. En general, lo más adecuado es realizar una primera fase de inspección general en la que se establezcan las zonas y partes de la estructura a analizar, de modo que sean representativas del conjunto de la estructura. Es importante y de gran ayuda la existencia de planos al menos a nivel de estructura. Esta inspección previa varía en cada edificio, su altura, materiales empleados en las fachadas, facilidad de acceso a la cubierta, forma de acceso al mismo, etc. Se marcarán los puntos donde deben realizarse un análisis más profundo de la madera atendiendo, generalmente, a zonas húmedas o potencialmente dañadas. Además se revisará el estado aparente de las fachadas, cubiertas y particiones interiores para detectar signos de patología estructural.

En una segunda fase se realiza la inspección de las zonas marcadas anotando la patología encontrada y sus características. Este reconocimiento de la estructura se dirige a valorar los daños producidos por los agentes xilófagos con el fin de evaluar la pérdida de sección de las piezas afectadas y su repercusión en el comportamiento estructural. El reconocimiento también puede incluir la obtención de muestras para la identificación de la especie de madera, la determinación de su calidad y la geometría de la estructura con el fin de comprobar su capacidad portante.

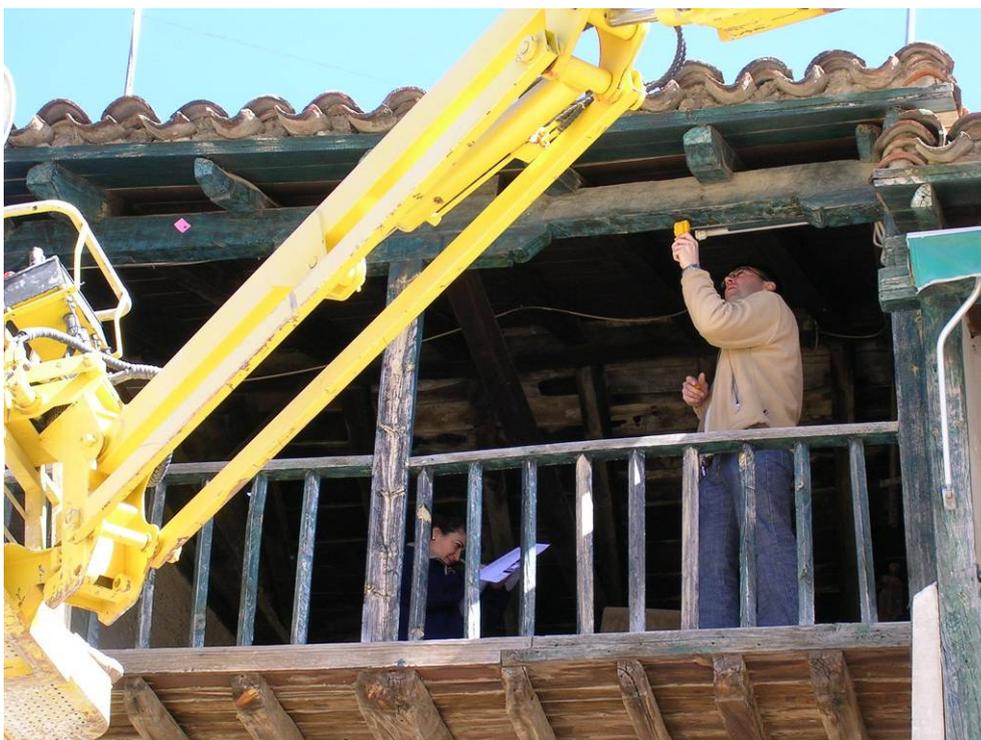


Figura 3 - Inspección visual de la estructura.

La inspección visual de la estructura requiere de un equipo mínimo (xilohigrómetro, punzón, martillo de pasta, cámara fotográfica, etc). En ocasiones no resulta trivial, requiriendo un entrenamiento adecuado y en no pocas ocasiones la dificultad mayor estriba en la accesibilidad a la estructura. La clasificación visual de la madera en función de su aspecto

exterior ha sido, y es, el método más usado para tomar una decisión sobre la calidad mecánica de la madera.

### **Técnicas instrumentales**

La identificación de la especie de madera sirve para conocer tanto las características de resistencia físico-mecánicas como de durabilidad natural ante los ataques xilófagos. Para tener una aproximación de la especie de madera, primeramente se realiza una inspección visual inicial o análisis macroscópico que permite conocer distintas características, como porosidad, tipo de radios, anillos de crecimiento, etc. El análisis microscópico de la muestra obtenida permite determinar y caracterizar los distintos elementos estructurales que la constituyen, así como su disposición, orden, abundancia, etc., y con la ayuda de unas claves se procede a la identificación de la especie.

### **Ensayos destructivos**

Realizados en laboratorio para determinar las características mecánicas de una especie, procedencia, etc. Consisten en la realización de ensayos en una máquina universal que determina fundamentalmente los valores de Resistencia a flexión y Módulos de Elasticidad. Con dichos valores se procede al cálculo de los valores característicos y medios de las propiedades mecánicas de la especie. Según EN 384, la caracterización se basa en el concepto del cálculo del 5º percentil de la distribución de los valores de la resistencia y la densidad por el método no paramétrico, a lo que se conoce como valores característicos de la población.



Figura 4 - Ensayo destructivo a flexión para la determinación del módulo de elasticidad global de canto a flexión (MOEGTO).

Es impropio el utilizar este tipo de análisis para la madera de edificios en pie, dado que lo que se busca es conocer su estado sin alterar sus propiedades. Por ello la utilización de ensayos quasi no destructivos y no destructivos es lo más indicado.

## Ensayos quasi no destructivos

### Resistógrafo

Este método se basa en la resistencia que la madera opone a la penetración de una broca a velocidad constante, dado que esta resistencia está correlacionada con la densidad (Costello y Quarles, 1999; Gruber, 2000). El equipo mide la resistencia a la penetración de una broca de diámetro entre 1,5 y 3 mm cuyo agujero es tan pequeño que su efecto es inapreciable. La broca penetra hasta una profundidad de 40 cm a una velocidad constante por lo que se requiere aplicar una cantidad de fuerza variable según la zona que atraviese y son esas variaciones de fuerza a lo largo del tiempo las que se representan en una gráfica. La integral de la curva fuerza-tiempo es la variable indicadora del ensayo. La resolución del método es tan alta, que se pueden detectar variaciones de densidad incluso entre los anillos de crecimiento. Las medidas tomadas por el equipo se almacenan en un ordenador o se imprimen a medida que la broca penetra en el material.

El método es de gran interés para el diagnóstico de estructuras de madera en las zonas de empotramiento que quedan ocultas a la inspección visual y no muestran síntomas de degradación. Hasta ahora es una técnica incipiente y está siendo actualmente experimentada por miembros del grupo de investigación, tanto en laboratorio como en estructuras a pie de obra. Los primeros resultados obtenidos indican que la dirección de penetración de la broca (analizando dirección horizontal, vertical y a 35°) no influye significativamente en el valor medio de la gráfica. Los valores medios de la gráfica del resistógrafo realizadas sobre piezas de pino silvestre dieron un rango entre 243,8 a 292,0. La interpretación de la salida gráfica de la penetración del resistógrafo permite detectar zonas dañadas con galerías o pudriciones por la pérdida brusca de resistencia, sin embargo el valor numérico medio de la gráfica completa en una sección no detecta diferencias significativas entre una zona dañada por hongos o insectos xilófagos y una zona sana.



Figura 5 - Utilización in situ del resistógrafo.

### Extractor de tornillos

Esta técnica de ensayo es un método extendido en países como Estados Unidos o Hungría pero poco conocido en nuestro país. El aparato registra la resistencia al arranque de un tornillo de 4 mm de diámetro y 18 mm de longitud, estando esta variable estrechamente relacionada con la densidad y el módulo de elasticidad de la madera en piezas de pequeñas dimensiones y libres de defectos. Sin embargo la escasa penetración del tornillo apenas 2 cm ofrecen una información muy localizada de la pieza y difícil de extrapolar a madera estructural y/o de grandes escuadrías.

La resistencia al arranque de tornillos depende no sólo de las características intrínsecas del material que va a ser ensayado, sino también de aspectos relacionados con los aparatos de medida y con el procedimiento seguido. En este sentido, deben de fijarse previamente unos criterios que influyen en la resistencia al arranque de tornillos: diámetro del tornillo a utilizar, longitud de tornillo que debe introducirse, definición de las zonas donde se deben realizar las mediciones, evitando las zonas de nudos y de fendas, y número de extracciones que deben hacerse por muestra.

Los ensayos previos que se han realizado en este trabajo han tenido como objetivo fundamental analizar la eficacia del extractor de tornillos como técnica de diagnóstico predictora de daños bióticos en la madera puesta en obra. Las conclusiones han demostrado que se puede utilizar en este sentido, introduciendo el tornillo hasta una profundidad de 28 mm. Resulta de gran aplicación para aquellos casos en los que la madera no da indicios externos de su estado de degradación.



Figura 6 - Extractor de tornillos y su empleo in situ.

Por otro lado, hemos podido comprobar en nuestro laboratorio<sup>9</sup> que existe una relación estadísticamente significativa entre la densidad media de las piezas y la fuerza media de arranque, de modo que se ha determinado también la ecuación que permite calcular la densidad de la madera a partir de la fuerza medida con el extractor de tornillos. La ecuación del modelo ajustado, es la siguiente:

$$\text{Densidad (g/cm}^3\text{)} = \frac{1}{0,678585 + \frac{3,42549}{\text{Fuerza canto (kN)}}$$

El coeficiente de correlación obtenido ( $r$ ) es de 0,80, mientras que el coeficiente de determinación ( $r^2$ ) resulta ser de 0,65.

## Ensayos no destructivos

### Técnicas basadas en ondas ultrasónicas

Esta técnica se basa en la posibilidad de determinar la capacidad resistente de la madera a partir de la velocidad de la onda sónica, debido a que la presencia de oquedades, nudos, bolsas de resina o degradaciones internas, hacen que la velocidad de transmisión de las ondas generadas sea diferente de la que presenta en el material sin defectos. La velocidad de la onda generada se calcula a partir del tiempo que tarda en recorrer la distancia entre dos sensores. Conocida la densidad de la madera se puede calcular el módulo de elasticidad dinámico, muy relacionado con el módulo de elasticidad estático.

La constatación de la relación entre la velocidad de la onda y el módulo de elasticidad (Bucur 1984, Acuña et al. 2001, Hermoso et al. 2003) aporta información sobre la calidad general de la piezas, sin embargo la relación con el módulo de rotura pierde interés ya que éste suele depender de un defecto local que produce la rotura y en la propagación de la onda no influye un defecto por sí solo (Hermoso et al. 2003). En definitiva, la velocidad de propagación será mayor cuanto menor sea la presencia de defectos en la madera, debido a que, por ejemplo las fendas, las desviaciones de fibras generales o las locales producidas por los nudos, provocan la interrupción de la continuidad de transmisión de la onda, y por tanto retardan su llegada al receptor.

La utilización del equipo Sylvatest para la evaluación de la clasificación resistente de madera estructural es un método que aporta información importante en la evaluación global aunque con menores rendimientos al de otros métodos de clasificación automática (Hermoso et al. 2003). La medición de la velocidad de propagación de los ultrasonidos se efectúa con facilidad en obra y permite estudios bastante completos como ya han demostrado Rodríguez Liñán (2000) y su equipo.

Esteban M. (2003) en su tesis obtiene una buena relación entre la velocidad del paso de ultrasonidos en dirección longitudinal y el módulo de elasticidad global. Trabaja con 117 piezas de madera de grandes escuadría procedentes de diferentes edificios antiguos, de pino silvestre y pinaster. Aplicando la técnica de ultrasonidos la clase resistente la define como F16/E22/D30. Propone establecer clases de velocidad de propagación de ultrasonidos por encima de 4.100 m/s para obtener rendimientos aceptables.

Pinus sylvestris o Pinus pinaster

Velocidad m/s 4.100 ..... C18(por rigidez, inferior por resistencia a flexión)

Velocidad m/s > 4.900 ..... C16(por resistencia) y C22 (por elasticidad)

Hermoso et al. (2003) analizan una muestra de 735 piezas de madera nueva de distintas dimensiones en *Pinus nigra* y otras 1.327 de *Pinus sylvestris*, fijan la siguiente tabla de valores de paso y clases resistentes.

Pinus nigra

Velocidad m/s 5.200 ..... C35

Velocidad m/s 4.300 ..... C18

Pinus sylvestris

Velocidad m/s 4.950 ..... C27

Velocidad m/s 4.325 ..... C18

Según resultados en madera vieja de silvestre realizados por nuestro propio grupo de investigación velocidades de propagación por el método indirecto superiores a 4.400 m/s se correspondían con piezas con un módulo de elasticidad global de canto superior a 10.000 N/mm<sup>2</sup> correspondiente a la clase C22, si bien el valor obtenido del percentil 5 ó característico de la resistencia a flexión fue inferior a la clase C14, aunque el valor medio fue bastante más alto. De 28,6 N/mm<sup>2</sup>, concretamente.

### Técnicas termográficas

La termografía es una técnica no destructiva muy prometedora. Debido a que la conductividad del calor de la madera depende de su densidad, los cambios de la temperatura de superficie de la madera también dependen de su densidad, hecho muy importante dado que la madera biodeteriorada tiene menor densidad que la madera sana. James y Rice (2002) han realizado inspecciones de edificios en busca de termitas con técnicas termográficas en las que las imágenes obtenidas revelan actividad de xilófagos, a pesar de tratarse de animales de sangre fría, al poseer un tipo de bacteria residente en su sistema digestivo que les ayuda a metabolizar la celulosa de la que se alimentan.

Por razones distintas, la pérdida de calor que supone la elaboración de la humedad que pueda tener la madera afecta a su temperatura, que desciende, y esta diferencia puede ser observada con mucha claridad en las termografías. Por ello, esta técnica permite la inspección rápida en obra de amplias zonas, facilitando la localización de focos de humedad potencialmente peligrosos para la durabilidad de la madera.

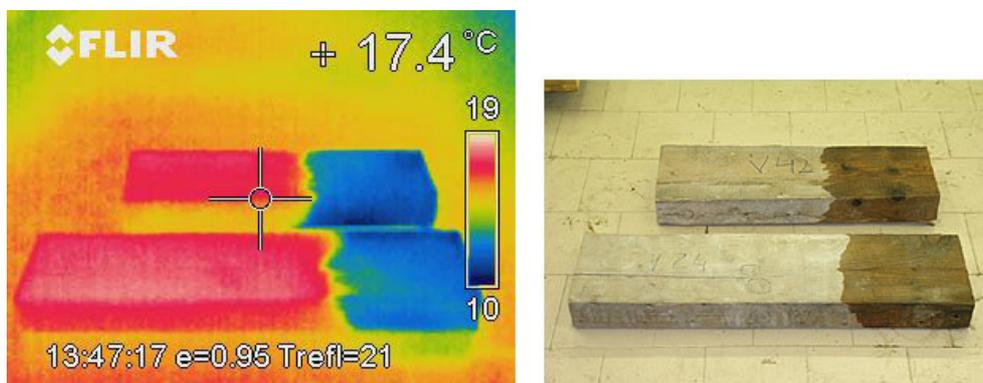


Figura 7 - Imagen termográfica y real de las mismas probetas.

Hasta ahora es una técnica incipiente, pero dado su enorme potencial está siendo actualmente experimentado por miembros del grupo de investigación tanto en laboratorio como en estructuras a pie de obra.

## 4. CONCLUSIONES PROVISIONALES Y LINEAS DE TRABAJO

Se ha constatado que las **normativas** nacionales de referencia<sup>10</sup> no son de aplicación directa en la comprobación de la seguridad de estructuras existentes, por lo que precisarán necesariamente metodologías específicas de verificación

En el ámbito geográfico más frecuentado por nuestro grupo, y en concreto en la región de Castilla y León, en las estructuras existentes se ha encontrado una presencia mayoritaria de

madera de coníferas, fundamentalmente pino de la especie *Pinus sylvestris* y, en menor medida, *Pinus pinaster*. Sus características morfológicas y biológicas apuntan a elementos de rechazo a la vista de la normativa de clasificación visual española, pensada para unas escuadrías y tamaños anómalos en edificios históricos. La futura extensión del trabajo permitirá avanzar en la aplicación de los métodos probabilistas adoptados en la normativa más reciente y en la de aparición inminente, en los términos en que se han publicado los proyectos correspondientes.

Las degradaciones más frecuentes son de origen biótico, principalmente por combinación en diferentes proporciones de hongos de pudrición e insectos xilófagos de ciclo larvario, fundamentalmente de la familia de los anóbidos (carcoma) y de cerambícidos. Menos frecuentemente se ha detectado la presencia de insectos de tipo social (termitas). Salvo casos excepcionales los ataques detectados son de intensidad media sobre la albura, no pasando de profundidades del orden de los 2 cm. Esto implica, por lo general, una pérdida de sección resistente poco importante para los tamaños de escuadrías habituales en dichos edificios. No obstante, las cabezas de los elementos estructurales empotradas son puntos donde estos daños puede suponer una pérdida parcial o completa de su capacidad de carga, detectable solamente mediante determinadas técnicas específicas, y que es uno de los objetivos fundamentales del desarrollo de este trabajo.

En lo que se refiere a las técnicas de inspección y reconocimiento in situ, podríamos concluir que las técnicas convencionales (reconocimiento visual, punzón, etc.) han demostrado su competencia. El xilohigrómetro resulta eficaz para la aproximación a las zonas lesionadas o potencialmente degradadas de modo puntual. La termografía permite inspeccionar zonas más amplias, focalizando las zonas de interés por esta circunstancia. El resistógrafo ha aportado utilidad para la inspección de zonas de madera no visibles muy sensibles a la pérdida de material y por lo tanto de capacidad resistente, como los extremos empotrados, siendo hasta ahora una técnica incipiente de la que se dispone de pocos datos. En esta línea trabajan actualmente investigadores del grupo, con resultados prometedores que esperamos aportar en un futuro próximo.

Los ensayos que se realizaron con el extractor de tornillos demostraron su eficacia en el diagnóstico de daños bióticos ya que es capaz de detectar diferencias en la resistencia al arranque en función del estado de la madera, resultando de gran utilidad cuando ésta no da indicios externos de su estado de degradación. Asimismo, se ha obtenido que para el rango de humedades medias de las piezas del estudio, ésta no influye sobre la fuerza media de arranque pero es necesaria la realización de ensayos con rangos de humedad más amplios para estudiar esta relación con mayor precisión. Por otro lado, el MOEGTO (módulo de elasticidad global de canto a la flexión) presenta una relación estadísticamente significativa con la fuerza media de arranque de las piezas, pero el bajo coeficiente de determinación logrado en el ajuste impide utilizar la ecuación obtenida para estimar con seguridad el módulo de elasticidad a partir de la fuerza. Sí se ha comprobado la existencia de una relación entre la densidad media de las piezas y la fuerza media de arranque obtenida, de modo que se ha determinado la ecuación que permite calcular la densidad de la madera a partir de la fuerza medida con el extractor de tornillos.

En un futuro, y como continuación natural de la investigación en curso, los objetivos podrían hacerse extensibles a la estructura en su conjunto, lo que conlleva el análisis del complejo comportamiento de los nudos y la interacción de las piezas a través de ellos y con otros sistemas y elementos estructurales y constructivos. La aplicación de métodos numéricos como el de los elementos finitos, por ejemplo, puede representar en un futuro próximo la posibilidad de sustituir determinado tipo de ensayos por su simulación virtual infográfica. Para ello la investigación ha de ir conociendo y poniendo a punto las variables

fundamentales que permitan su implementación en este tipo de estructuras, como ya está siendo en estos momentos investigado por otros grupos a escala internacional.

En definitiva, este trabajo en su versión final intentará contribuir a establecer criterios y procesos de aplicación general para la inspección y diagnóstico de estructuras de madera, sistematizando la recogida y gestión de los resultados de su análisis en un proceso orientado al proyecto.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Este proyecto está financiado por el Ministerio de Fomento en el marco de las Acciones Estratégicas sobre “Mantenimiento y evaluación de estado de obras y edificios” del Área Sectorial “Construcción Civil y Conservación del Patrimonio Histórico Cultural” del Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica 2000-2003”, con la colaboración de la Junta de Castilla y León y la empresa privada Técnicas para la Restauración y Construcciones, TRYCSA.

## 6. REFERENCIAS

Acuña L.; Casado, M.; Basterra, A. et al. 2004. Evaluación resistente no destructiva de madera de *Pinus pinaster* Ait. de las regiones de procedencia “Gredos” y “Bureba-sierra de Oña”. En *Iº Congresso ibérico a madeira na construção*. Guimarães-Braga: Paulo Cruz (ed.). ISBN 972-8692-10-2.

Acuña L.; Llorente A.; Casado, M.; Herrera, C. 2001. *Clasificación de la madera de Pinus sylvestris L. Mediante ensayos no destructivos*. III Congreso Forestal Español. Granada.

Argüelles, R.; Arriaga, F. [1996] 2000. *Estructuras de madera. Diseño y cálculo*. AITIM, Madrid.

Arriaga, F.; Peraza, F.; Esteban, M.; et al. 2002. *Intervención en estructuras de madera*. AITIM, Madrid.

Arriaga, F.; García, L.; Gebremedhin, K.G.; Peraza, F. 1992. Evaluación de la capacidad portante de forjados antiguos con vigas de madera. *Revista AITIM* nº 161, p. 51-62.

Basterra, A.; Acuña L.; Casado, M.; et al. 2004. Evaluación preliminar de la estructura de madera de quince (12+3) monumentos declarados B.I.C. en Castilla-León. En *Iº Congresso ibérico a madeira na construção*. Guimarães-Braga: Paulo Cruz (ed.). ISBN 972-8692-10-2.

Bertolini, C.; Brunetti, M.; Cavallero, P.; Macchioni, N. 1998. A non destructive diagnostic method on ancient timber structures: some practical application examples. In *5th World Conference on Timber Engineering, Montreaux, Switzerland*, Vol. I, p. 13-37.

Bonamini, G. 1996. Restoring timber structures: inspection and evaluation. In *Timber engineering Step 2*. Centrum Hout, Holanda.

Bonamini, G.; Ceccotti, A.; Montini, E. 1992. Indagini non distruttive per la verifica strutturale di legno antico. Dipartimento di Ingegneria Civile. Università di Firenze. *Legno materiale per l'ingegneria civile. Raccolta Monografica. Sezione strutture n° 16/90*, 118 p.

Ceccotti, A.; Togni, M. 1996. NDT on ancient timber beams: assessment of strength/stiffness properties combining visual and instrumental methods. In *10th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, Lausanne*.

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 (inédita). Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Universidad Politécnica de Madrid.

Hermoso et al. 2003. Evaluación de la clasificación resistente de la madera estructural mediante ultrasonidos. *Actas del 10º Congreso Nacional de Ensayos no Destructivos*.

Kuklík, P.; Dolejš, J. 1998. Nondestructive evaluation of structural timber. In *5th World Conference on Timber Engineering, Montreaux, Switzerland*, Vol. I, p. 692-699.

Laffarga, J. 1992. Aplicación de la programación de ondas ultrasónicas para el estudio de las maderas. *Revista de Edificación RE n° 11*. Universidad de Navarra, p. 21-28.

Llorente, A.; Acuña L.; Casado, M.; et al. 2004. Aplicación informática para la clasificación visual de la madera. En *Iº Congresso iberico a madeira na construção*. Guimarães-Braga: Paulo Cruz (ed.). ISBN 972-8692-10-2.

Tampone, G. 2002. *Strutture di legno: Cultura-conservazione-restauro*. deLettera. Milano.

Rinn, F., 1994. Resistographic inspection of building timber. In *Pacific Timber Engineering Conference, Gold Coast, Australia*, Vol. 2, p. 469-478.

Rodríguez, C.; Rubio, P. 2000. *Evaluación del estado de la madera en obras de rehabilitación mediante técnicas de ultrasonidos*. Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción. Universidad de Sevilla.

## 7. PIES DE FIGURAS, FOTOS, GRÁFICOS Y TABLAS

Tabla 1. Tensión de rotura a flexión deducida de la regla de Barlow y densidad de referencia. Modulo de elasticidad de algunas especies según la Enciclopedia Roret

Tabla 2. Tensión de rotura y admisibles de tracción u compresión según J. López (1885)

Figura 1. Niveles de inspección.

Figura 2. Laboratorio de Maderas de la Universidad de Valladolid.

Figura 3. Inspección visual de la estructura.

Figura 4. Ensayo destructivo a flexión para la determinación del módulo de elasticidad global de canto a flexión (MOEGTO).

Figura 5. Utilización in situ del resistógrafo.

Figura 6. Extractor de tornillos y su empleo in situ.

Figura 7. Imagen termográfica y real de las mismas probetas.

## 8. NOTAS FINALES

---

<sup>1</sup> NAVASCUÉS, P. 1983; *Estudio crítico de la obra de Benito Bails: De la Arquitectura Civil*. 1796. Dos tomos editados por el Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Murcia.

<sup>2</sup> ARRIAGA, F. 1998; *La carpintería en el Tratado de Arquitectura Civil de Benito Bails*. AITIM nº 191. pp. 33-48.

<sup>3</sup> BOOTH, L. G. 1964; "The strength testing of timber during the 17<sup>th</sup> and 18<sup>th</sup> centuries. Institute of Wood Science Journal nº 13, November 1964, pp5-30.

<sup>4</sup> BISTON, HANUES, BOUTEREAU y GAUCHE 1998; *Manuels-Roret. Nouvau Manuel Complet du charpentier ou Traité élémentaire el pratique de cet art*.1825. Edición de Inter-livres.

<sup>5</sup> LÓPEZ, J. y LANJA, C. 1885; *Tratado de industria. Trabajo de metales y maderas*. Imprenta de Ondero. P. 472.

<sup>6</sup> A estos efectos están plenamente generalizados los ensayos sobre piezas de tamaño comercial, que han sustituido gradualmente a los efectuados sobre probetas pequeñas y libres de defectos.

<sup>7</sup> Este aparato comercial consta de dos sondas que actúan una como emisor y otra como receptor, acopladas a una estación que recoge el tiempo (en  $\mu$ s) de propagación de la onda emitida a 30 kHz, al atravesar la madera. Con el fin de conseguir un contacto íntimo con la madera, las sondas tienen una forma cónica y se practica un orificio de 5 mm de diámetro y 1 cm de profundidad en las zonas donde se introducen los extremos de los palpadores.

<sup>8</sup> La norma UNE 56.544:2003, actualmente vigente, clasifica como madera no estructural, o de rechazo, cualquier presencia de galerías de insectos xilófagos, condición excluyente, de principio, para casi cualquier elemento estructural de madera de cierta antigüedad.

<sup>9</sup> El trabajo referido, terminado muy recientemente, ha sido elaborado por Pinazo, O. y dirigido por Casado, M. y Basterra A. Se encuentra pendiente de publicación.

<sup>10</sup> Códigos experimentales europeos –Eurocódigo 5– y Código Técnico de la Edificación, de próxima vigencia en España.