

## Evaluación de la madera estructural para la rehabilitación de las Naves Cros (Valencia, España) por medio de diferentes técnicas no destructivas

### Lucas Capuz Lafarga

Universidad Politécnica de Valencia  
Camino de Vera s/n 46022 Valencia España  
[lucala@csa.upv.es](mailto:lucala@csa.upv.es)



### Rafael Capuz-Lladró

Universidad Politécnica de Valencia  
Camino de Vera s/n 46022 Valencia España  
[rcapuz@upvnet.upv.es](mailto:rcapuz@upvnet.upv.es)



### Francisco García-García

Universidad Politécnica de Valencia  
Camino de Vera s/n 46022 Valencia España  
[fgarcia@trr.upv.es](mailto:fgarcia@trr.upv.es)



### Isabel Rodríguez-Abad

Universidad Politécnica de Valencia  
Camino de Vera s/n 46022 Valencia España  
[isrodab@upvnet.upv.es](mailto:isrodab@upvnet.upv.es)



### Rosa Martínez-Sala

Universidad Politécnica de Valencia  
Camino de Vera s/n 46022 Valencia España  
[rmsala@fis.upv.es](mailto:rmsala@fis.upv.es)



### Rafael Díez-Barra

laboratorio de Estructuras. Instituto Nacional del  
Investigaciones Agrarias (INIA), Ctra. Coruña, km  
7.5, 28040 Madrid  
[fgarcia@trr.upv.es](mailto:fgarcia@trr.upv.es)



**Palabras clave** – Ensayos no destructivos, georradar, resistógrafo, ultrasonidos, madera estructural.

**Keywords** – Non-destructive testing, Ground-penetrating radar, resistograph, ultrasound technique, timber.

### RESUMEN

El proyecto de rehabilitación de una de las naves del complejo fabril de la industria química “CROS” en Valencia se llevó a cabo con el criterio de mantener, en la medida de lo posible, los elementos estructurales presentes en la nave. Con este objetivo se realizaron una serie de ensayos no destructivos (END) in situ. Estos ensayos permitieron evaluar la calidad de la madera, determinar qué elementos estructurales debían ser sustituidos y comprobar la aptitud de los que iban a ser reutilizados. Los END empleados en este estudio fueron los siguientes: (1) Identificación de la especie por técnicas anatómicas, (2) Clasificación resistente por método visual, (3) Estimación de humedad por la técnica de resistencia eléctrica; (4) Obtención de velocidades de propagación ultrasónicas (5) Resistografía y (6) Alteración de la propagación de ondas electromagnéticas por medio de Georradar. Para la calibración de estos END se tomó una muestra de piezas y se hicieron ensayos destructivos bajo condiciones controladas en laboratorio. En el trabajo que aquí se presenta se muestra la metodología empleada durante el proceso de toma de datos, de análisis de resultados y de cruce de la información obtenida a partir de cada uno de los ensayos hasta llegar a un diagnóstico para los elementos analizados.

## ABSTRACT

The assessment of structural timber was requested in the rehabilitation project of the Naves of the chemical industry "CROS". The criterion was to maintain as much as possible timber of the structure and to make only partial replacements. In order not to damage the existing structure and to assess the quality of the existing timber, a series of non-destructive testing (NDT) in the entire structure were performed: (1) Identification of the species by anatomical techniques, (2) Strength grading by visual method, (3) Estimation of moisture content by the technique of electrical resistance, (4) Acquisition of ultrasonic propagation velocities (5) Resistography and (6) Record of the propagation of electromagnetic waves by means of Ground-penetrating radar. Following, a sample group was chose to carry out destructive testing in the lab and compare the NDT results with those obtained with the standard UNE-EN408 (modules of strength, stiffness and density). In the present work, the results provided by each of the NDT techniques are detailed and above all, what is more important, the validity of these after they have been contrasted with the destructive standard tests.

## 1. Introducción

Las naves industriales que son objeto de estudio en este trabajo formaban parte de un antiguo conjunto fabril de la empresa Cros construido en Valencia a principios del siglo XX. Estas naves, cuya tipología es la de un tinglado de muelle ferroviario o portuario con estructura de madera, están incluidas en el Catálogo de edificios protegidos del Plan General de Valencia ya que constituyen un magnífico ejemplo de la arquitectura industrial de la época.

Tras un largo periodo de abandono, las naves presentaban un avanzado estado de deterioro. Los restos que quedaron en pie correspondían a una nave de doble crujía y otra de triple (Fig. 1). Las cerchas, que tienen una luz de 19 m, están construidas con madera y se apoyan sobre pilares también de madera. La cubierta es de teja plana y los cerramientos, que cubren parcialmente las partes frontales de las naves, están contruidos con tablas de madera. Los pilares están colocados sobre una base de fundición apoyada a su vez sobre una base de ladrillo macizo.

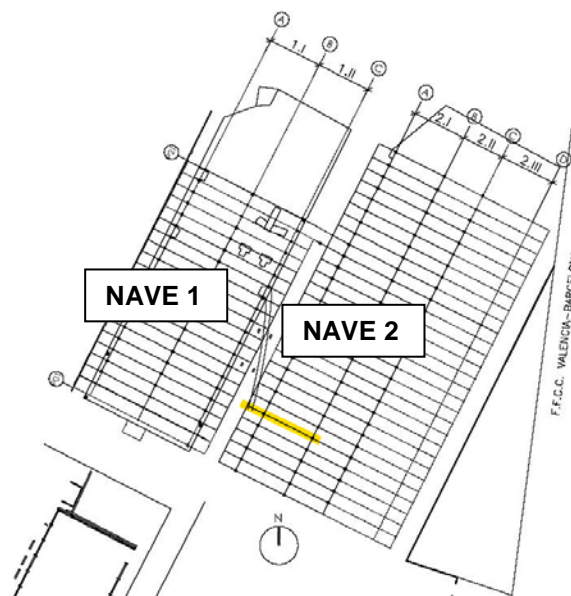


Fig.1 Esquema de la planta de las naves 1 y 2.

Con el fin de frenar el deterioro y recuperar la estructura de la nave de doble crujía (Nave 1), que era la que presentaba un mejor estado de conservación, se abordó el proyecto de rehabilitación. El criterio adoptado por la dirección facultativa de este proyecto fué el de mantener, en la medida de lo posible, los elementos estructurales presentes en la Nave 1 y en caso de ser necesaria la sustitución parcial o total

del material, emplear como material de sustitución la madera procedente de la Nave 2 que no se iba a rehabilitar (Fig. 2).



Fig. 2 a) Vista de la nave que permanece (Nave 1), b) Vista de la nave que se demuele (Nave 2)

Con la premisa de conservar tanto como fuera posible la estructura existente, se realizaron una serie de ensayos no destructivos (END) para determinar in situ qué elementos estructurales debían ser sustituidos y comprobar la aptitud de los que iban a ser reutilizados. Los END utilizados en el estudio fueron: (1) Identificación de la especie por técnicas anatómicas, (2) Clasificación resistente por método visual, (3) Estimación de humedad por la técnica de resistencia eléctrica; (4) Obtención de velocidades de propagación ultrasónicas, (5) Resistografía, y (6) Variación de la propagación de ondas electromagnéticas por medio de georradar. Todos estos ensayos fueron validados contrastando sus resultados con los obtenidos de los ensayos de rotura normalizados (UNE-EN408) realizados en laboratorio sobre algunas muestras. Apoyándose en los resultados obtenidos se realizó una revisión exhaustiva de cada una de las zonas de la estructura que planteaban dudas acerca de su buena conservación y mantenimiento de las condiciones de servicio.

El potencial de algunas de estas técnicas no destructivas, como son el resistógrafo, la técnica de ultrasonidos y el georradar, en la caracterización de la madera estructural ha sido tratado previamente por algunos autores como Capuz (2003, 2007) y Rodríguez-Abad (2008, 2009, 2010).

Tomando como base el estudio llevado a cabo en las naves Cros, el objetivo de este trabajo es mostrar la metodología empleada durante el proceso de toma de datos, de análisis de resultados y de cruce de la información obtenida a partir de cada uno de los ensayos hasta llegar a un diagnóstico para los elementos analizados.

## 2. Material y métodos

En primer lugar se realizó la inspección visual de la estructura y a continuación se hizo la clasificación resistente por el método visual siguiendo el protocolo establecido en la norma UNE-EN 56544.

Los equipos utilizados en los ensayos no destructivos llevados a cabo in situ son los siguientes:

- En la estimación del contenido de humedad se usó un Xilohigrómetro de la marca DELMHORST® siguiendo el procedimiento de medición definido en la norma UNE-EN 13183-2:2002
- Para la medición de la velocidad de paso de onda ultrasónica se utilizó el equipo Sylvatest® que opera a una frecuencia de 20 Mhz.
- La obtención de resistogramas se realizó con un resistógrafo 1410-IML Resi B300®
- Las mediciones de las velocidades de propagación de las ondas electromagnéticas se efectuaron por medio de un equipo de georradar compuesto por una unidad central, cuyo modelo es el SIR-3000 y una antena de 1.6 GHz de frecuencia central. Los registros se procesaron con el software RADAN-NT. Tanto el equipo como el software han sido desarrollados por Geophysical Survey Systems Inc. (GSSI)

Finalmente, los ensayos destructivos realizados sobre muestras extraídas y bajo condiciones controladas se hicieron en el laboratorio CESELAB (CESEFOR-Soria).

El método empleado en la toma de datos y al análisis de resultados se divide en cuatro fases:

#### 1. Selección de piezas que han de constituir la muestra.

En primer lugar se realizó una inspección sobre el terreno. Se observó que en la Nave 2, que es la compuesta por tres crujías faltaba un gran número de sus cerchas. Sin embargo, en la nave de dos crujías (Nave 1), que iba a ser rehabilitada, del total de 42 cerchas que la componen le faltaban 14 y alguna se encontraba en muy mal estado. Además, en ambas naves existía un número importante de pilares que habían sido sustituidos o recrecidos por pilares de hormigón. El importante deterioro de la cubierta había favorecido que en las zonas donde el agua duerme, el grado de humedad fuese muy elevado, apreciándose pudrición parda.

Una vez realizada la inspección previa, el siguiente paso consistió en inspeccionar todas las cerchas de la Nave 2 para seleccionar unas piezas que fueran representativas de la población total de piezas. Estas piezas debían encontrarse libres de ataques de xilófagos y en el mejor estado posible, para poder utilizar los resultados de los ensayos realizados sobre ellas como patrón al inspeccionar, con estos mismos ensayos, el resto de las estructuras. Finalmente, se seleccionaron piezas procedentes de dos cerchas y dos arriostramientos de las cruces de San Andrés de secciones y escuadrías variables elegidas aleatoriamente a lo largo de dichas partes de la estructura.

#### 2. END sobre las piezas de la muestra.

Los END se llevaron a cabo con la secuencia siguiente:

- Se realizó una inspección visual con la ayuda de un punzón (Fig.3).
- Se determinó la humedad con higrómetro de agujas.
- Se realizaron pinchazos con resistógrafo en las zonas acotadas, en la propia pieza acotada y fuera de ella (Fig.4).
- Las medidas con georradar se realizaron deslizando la antena longitudinalmente sobre la superficie de las piezas. La toma de los registros se iniciaba por delante de la zona acotada, continuando por la misma y finalizándose por detrás de la zona acotada en el lado opuesto (Fig. 5).
- Se cortaron las piezas y se aplicó los ultrasonidos sobre las piezas ya cortadas, realizándose medidas de forma directa e indirecta (Fig.6).
- Se procesaron las mediciones obtenidas y se contrastaron los resultados de las mismas.



Fig.3.- Inspección visual con ayuda de punzón





Fig. 4.- Resistógrafo en un momento de la medición



Fig.5.- Mediciones de velocidad de propagación por la técnica de ultrasonidos



Fig. 5.- Equipo de georradar en el momento de medición de una viga

### 3. Ensayos destructivos sobre muestras extraídas de las piezas seleccionadas.

Con el objeto de confirmar los resultados obtenidos tras los END, se realizaron una serie de ensayos en laboratorio sobre una pequeña parte de la muestra y se determinó:

- La especie de pino correspondiente a los elementos estructurales de las Naves por medio de microscopía y comparación con muestras de la xiloteca INIA
- El Módulo de Elasticidad y el módulo de rotura siguiendo el protocolo establecido en la norma UNE-EN408.
- La densidad para un contenido de humedad del 12% y el contenido de humedad, según las normas UNE 56531:1977 y UNE-EN 13183-1:2002, respectivamente.

### 4. Estudio exhaustivo del resto de la estructura con END ya calibrados.

A partir de aquí se procedió al estudio de todas las piezas de todas y cada una de las cerchas, iniciándose el mismo por la Nave 2. En este caso se aplicaron todos los END ya empleados en las piezas de control.

El resistógrafo se empleó sólo en las zonas dudosas para detectar la extensión de la parte dañada. Las mediciones con ultrasonidos, realizadas de forma indirecta, y las de georradar sirvieron para prospeccionar las piezas longitudinales de las cerchas.

El conjunto de datos obtenidos se resumió en una representación gráfica con un informe indicando el tipo de daño o ataque detectado. La representación gráfica recogía los tres tipos de actuaciones, consolidación, refuerzo o sustitución, necesarias para recuperar la estructura.

### 3. Resultados y conclusiones

Los principales resultados que se obtuvieron de los END realizados en la fase 2 de este estudio se detallan a continuación:

1º Se trata de una conífera (pinacea) y, por el contexto documental, nos inclinamos por el *Pinus nigra* Arn. “Pino de Cuenca”.

2º 30% piezas ME1, 70% piezas ME2. Esta inspección visual nos indica que el acopio realizado en la época de construcción de la estructura fue precedido de una selección previa, bien en aserradero, bien en obra para excluir madera no apta.

3º Humedad, en obra 11,8% con rango entre 8.5-19% y 11.8 % ( 9.3-14.5) en el laboratorio CESELAB.

4º El resistógrafo en el resto de la cerchas se Utilizara para la localización de zonas críticas. Gráfico de la Pieza P-9

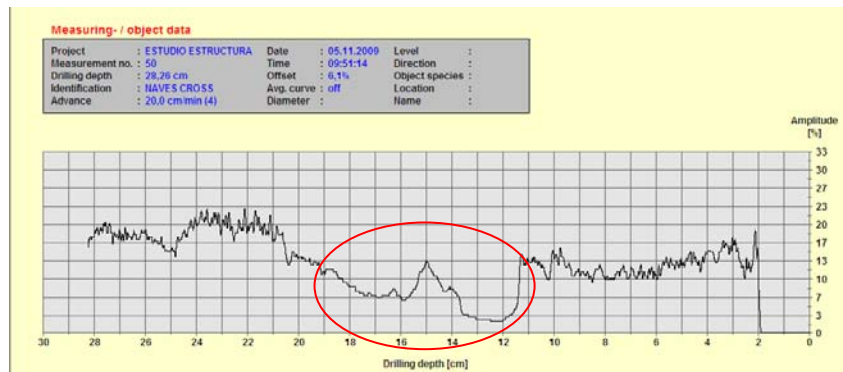


Fig 6. Nudo D de la Cercha 12 de la Nave 1 donde se aprecia una bajada de la grafica entre los 11,5 y 14 cm desde el origen que continua entre los 15 y 17 cm lo que significa la existencia de una pudrición entre los 11,5 y 17 cm.

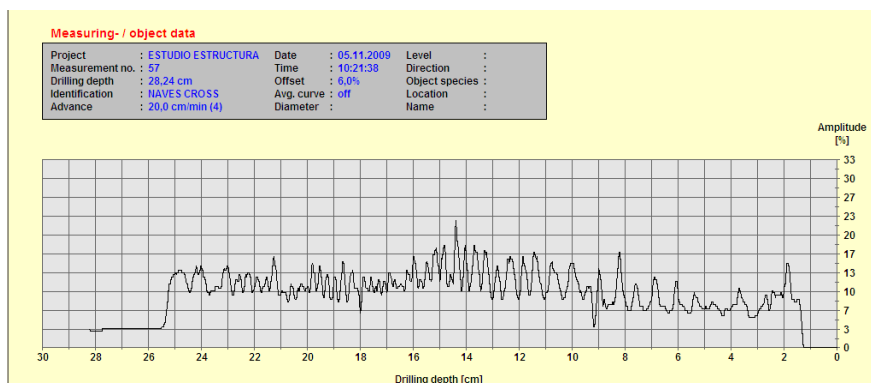


Fig 7. En este caso se trata del nudo AA de la cercha 12, de la Nave 1. Se trata de un nudo compuesto de tres piezas completamente sano. La primera pieza va de los 1,3 a los 9,2 cm, este es el punto más bajo de la gráfica. La segunda piezas es desde los 9,2 a los 18 cm, segundo punto más bajo de la gráfica; y la tercera pieza va de los 18 a los 25,5 cm.

5º Velocidad media del paso de la onda de ultrasonidos en el conjunto de las piezas: 4950 m/s.

6º Tras el diagnóstico de los radagramas se aprecia una notable uniformidad con nudos pequeños y poco numerosos. Nula presencia de elementos anómalos en el interior de las piezas estudiadas.

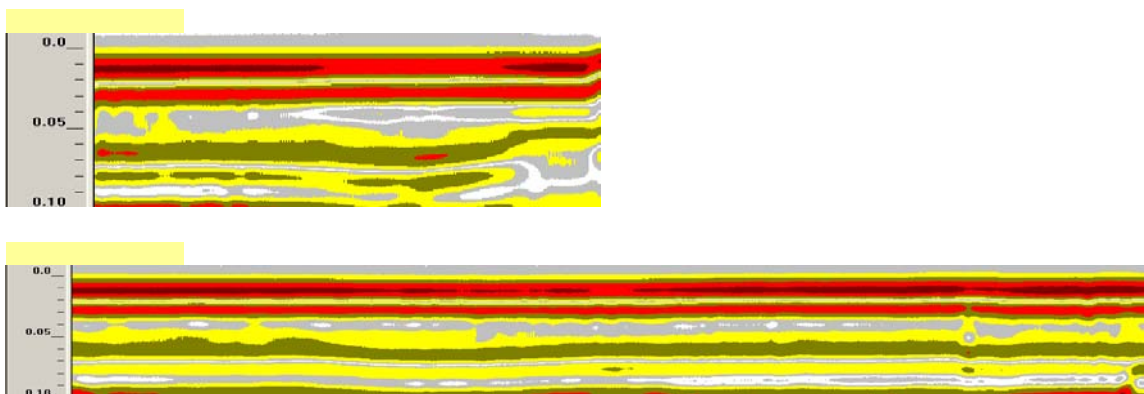
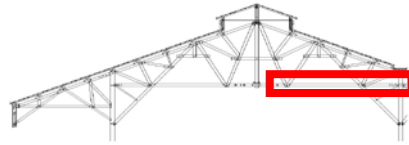


Fig. 8.-Radargramas correspondientes al tramo P-9

A continuación en la fase 3 del estudio se procedió a realizar los ensayos destructivos, siguiendo las normas correspondientes. Los resultados obtenidos fueron:

Módulo de rotura característico: 22.4 MPa  
 Módulo de elasticidad medio: 10.3 GPa  
 Densidad característica: 480 kg/m<sup>3</sup>

Esto nos permite, con las debidas reservas dado el tamaño del muestreo, que a efecto de cálculo y consolidaciones, se trata de una partida de "Pino de Cuenca" de calidad media-alta (C22 en EN338) con valores de paso de onda asimilable a C27, en humedad de equilibrio higroscópico.

A partir de aquí se procedió al estudio de todas y cada una de las cerchas iniciándose el mismo por la Nave 2. Los resultados obtenidos por cada una de las técnicas en toda la estructura se resumió de forma gráfica. En estos gráficos se detalla cada una de las patologías detectadas y tras el análisis de éstas se indica la mejor actuación posible. Como ejemplo se muestra en el figura 9 la cercha de la fila P6 de la Nave 2.

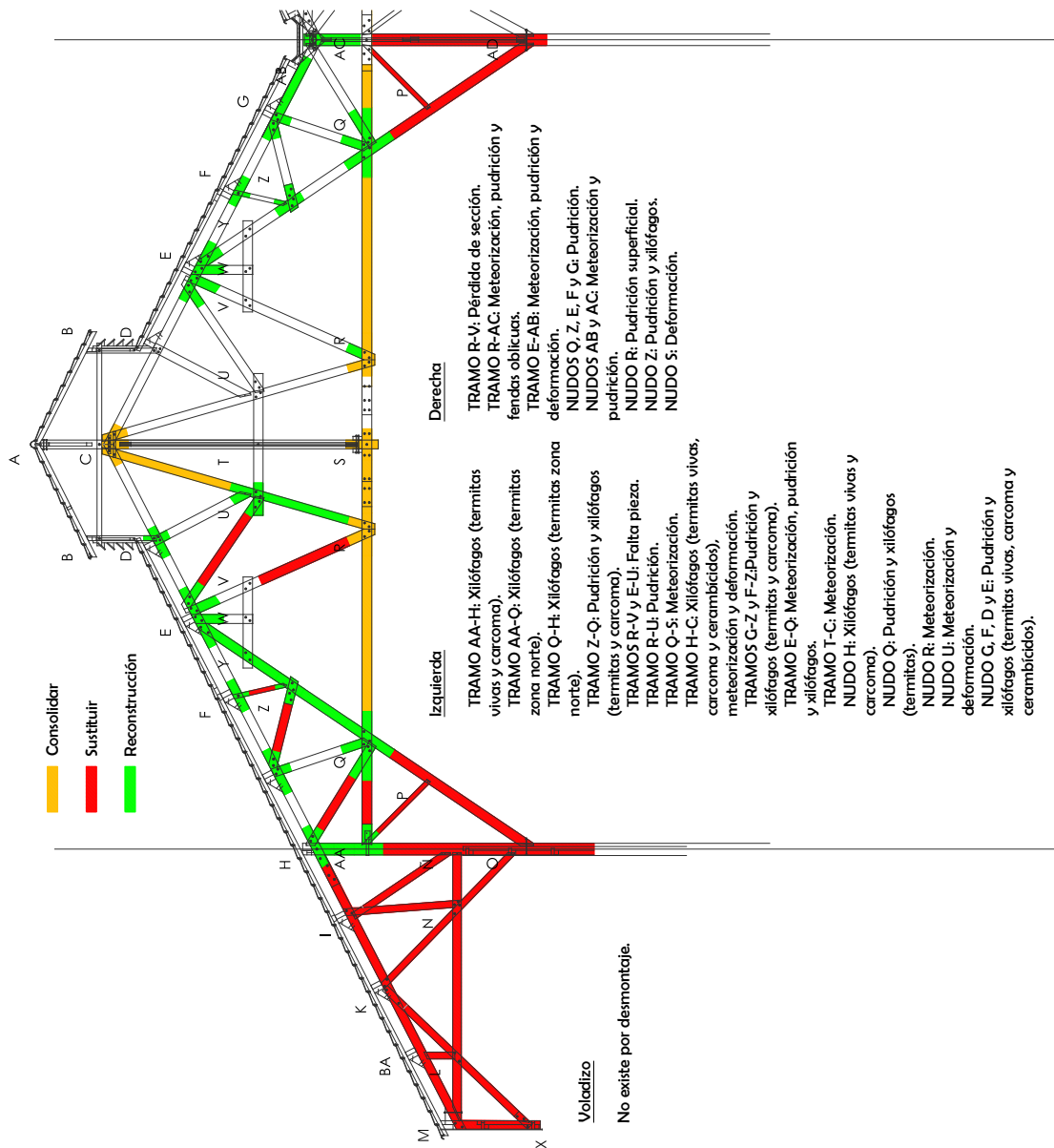


Fig. 9. Representación de las actuaciones a llevar a cabo en la cercha de la Nave 2 fila P6, tras el análisis de los ensayos realizados

La estimación de la seguridad estructural y la evaluación de los daños físicos de las estructuras de madera, requieren de un estudio pormenorizado mediante inspección visual y de la extracción de pequeñas muestras, si se permite, que luego son ensayadas en laboratorio. Cuando esto último no es posible, como ocurre en muchas ocasiones, bien sea por el valor histórico cultural de la estructura estudiada o por la dificultad de acceso, se hace necesario recurrir a la aplicación de un serie de técnicas no destructivas.

Como se ha visto en este estudio, estas técnicas no destructivas proporcionan información significativa sobre el estado de la pieza ayudándonos en la toma de decisiones sobre que tipo de actuación es más conveniente: consolidación, reconstrucción o sustitución. Y sobre todo manteniendo así el estado actual de las piezas originales sin causarles un daño permanente.

### Referencias Bibliográficas

Capuz R. (2003) " Métodos de ensayo no destructivos para la estimación de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas", Tesis Doctoral de la Universidad Politécnica de Valencia, España.



Capuz-Lladro R., Díez R., Rodríguez-Abad I., García-García F., Martínez-Sala R. y Tort I. (2007) "Comparación de técnicas no destructivas en la caracterización de vigas de madera estructural de diferentes especies". Actas del I Jornada Nacional de Investigación en Edificación, Madrid, España.

Rodríguez-Abad I., R. Martínez-Sala, F. García-García, R. Capuz-Lladro and R. Díez (2008), "A non-destructive method for the evaluation of density and moisture content in sawn timber structures by GPR, " Actas del 12th International Conference on Ground Penetrating Radar, Birmingham, Reino Unido.

Rodríguez-Abad, R. Martínez-Sala, R. Capuz-Lladro, F. García-García and L. Cabrelles (2009), "Application of the Non-Destructive Ground-Penetrating Radar (GPR) Technique to the Restoration Works of a Timber Structure,". Actas del I Congreso Internacional de Investigación en Edificación, Madrid, España

Rodríguez Abad I. (2010)" Aplicación de la técnica del georradar evaluación de la técnica no destructiva del georradar para la inspección, diagnóstico y análisis resistente de la madera", Tesis Doctoral de la Universidad Politécnica de Valencia, España.

UNE-EN 13183-2:2002. Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 2: Estimación por el método de la resistencia eléctrica.

UNE 56544:2007. Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas.

UNE-EN 408:2004. Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para su uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas.

UNE-EN 13183-1:2002. Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 1: Determinación por el método de secado en estufa.

UNE 56531:1977. Características físico-mecánicas de la madera. Determinación del peso específico.

UNE-EN 338:2003. Madera estructural. Clases resistentes