

DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD RESISTENTE MEDIANTE METODOS NO DESTRUCTIVOS. APLICACIÓN EN VIGUETAS DE FORJADO DE UN EDIFICIO SINGULAR

Casado M*, Basterra A**, Acuña L*, Pinazo O.* Martínez C*, Relea E*, Barranco I**, Ramón G.** Universidad de Valladolid.

*Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal. Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias. Avda. Madrid 44. 34071. Palencia. milac@iaf.uva.es

**Departamento de Ingenierías del terreno y Edificación. Escuela de Arquitectura de Valladolid. Avda. Salamanca s/n. 47014 Valladolid.

Resumen.

Este trabajo pretende estudiar la eficacia en la clasificación de madera vieja mediante métodos NDT (non destructive testing), se empleará un equipo de ultrasonidos Silvatest y el extractor de tornillos. El estudio se realizó sobre 39 viguetas de *Pinus sylvestris* de espesor 7,5 cm, anchura variable 17,5 - 20,5 y 22,5 cm y longitud de 300 - 400 y 500 cm, dichas viguetas pertenecen al forjado de un edificio singular de la provincia de Valladolid. Tras la clasificación visual de las viguetas con norma UNE 56544-03, se tomaron medidas con el ultrasonidos de la velocidad de propagación de la onda en las testas y caras, y se realizaron ensayos con el extractor de tornillos en las caras y canto inferior. Finalmente se realizaron en una máquina universal los ensayos mecánicos para el cálculo del Módulo de elasticidad y resistencia a la rotura. El objetivo fundamental de este trabajo de investigación es proporcionar y contrastar métodos no destructivos de ensayo, para determinar la clase resistente de madera estructural en estructuras existentes con fiabilidad y rendimiento aceptable. El trabajo que se presenta forma parte de una línea de investigación más amplia que pretende poner a punto una metodología de inspección, representación y análisis, que sirva de base en la toma de decisiones de intervención en el amplio patrimonio construido con estructuras de madera. Por otra parte no cabe duda de que un buen diagnóstico y conocimiento de la calidad estructural de la madera puesta en obra podría evitar su destrucción o sustitución en labores de restauración, ayudando así a un mejor aprovechamiento de los recursos forestales y su sostenibilidad.

Palabras clave: extractor de tornillos, ultrasonidos, resistógrafo, pino silvestre.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años se están llevando a cabo en España, tanto a nivel nacional como regional, importantes actuaciones en materia de patrimonio histórico y cultural de tal forma que los agentes involucrados en su gestión y conservación necesitan de la constante aplicación de tecnologías que consigan perfeccionar su actuación en los procesos de diagnóstico, protección, conservación, restauración y explotación sostenible de edificios históricos. La conservación y revalorización del patrimonio histórico representa un valioso elemento vertebrador del espacio socio-cultural y de dinamización económica dentro de una política de explotación adecuada y sostenible de los recursos regionales y de una estrategia de desarrollo económico.

El inminente Código Técnico de la Edificación preverá un conjunto de criterios para la evaluación de estructuras existente, en consonancia con las metodologías probabilísticas asumidas internacionalmente desde hace tiempo para el cálculo de estructuras con otros materiales, como el hormigón armado y el acero. Pero para que tal sistemática pueda ser realmente operativa será fundamental disponer de extensas bases de datos con información que relacione, en términos estadísticos. Los resultados de diferentes análisis destructivos y no destructivos con el valor de la probabilidad de que cada pieza alcance determinados valores de rigidez o resistencia.

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”.

MATERIAL Y METODOS

La madera empleada en el presente estudio es de un edificio de viviendas emblemático en la ciudad de Valladolid, en el que una empresa constructora ha procedido a una rehabilitación integral con conservación mayoritaria de la estructura de madera. Se trata de 39 viguetas de sección rectangular con unas dimensiones de 17,5 x 7,5 x 400 cm, 20,5 x 7,5 x 400 cm y 22,5 x 7,5 x 450 cm, que se corresponde a una de las crujiás de la planta primera, que ha sido reemplazada completamente.

Se realizaron los siguientes ensayos:

- i) Ensayo no destructivo con equipo de ultrasonidos
- ii) Obtención de perfiles resistográficos.
- iii) Ensayos en máquina universal.
- iv) Ensayos no destructivos mediante el extractor de tornillos.
- v) Determinación de la densidad y humedad.

i) Ensayo no destructivo con equipo de ultrasonidos.

Los ensayos de ultrasonidos se realizaron con un equipo marca Sylvatest® con una frecuencia de 30 khz. Este aparato utiliza un generador de ultrasonidos y, con la ayuda de un palpador emisor y de un palpador receptor, situados a una distancia fija, mide el tiempo (μ s) que tarda la onda ultrasónica en llegar de uno al otro.

En cada pieza se realizaron dos medidas directas, para lo cual los palpadores se colocaron enfrentados, es decir, de modo que la onda ultrasónica se propagara en paralelo al eje longitudinal de la pieza de testa a testa. También se utilizó el método indirecto en el que los palpadores se introducen formando un ángulo de 45° entre el eje longitudinal de la pieza y la superficie de las caras o del canto inferior (Figura 1). Ya que este método es útil – y en ocasiones el único posible- para tomar medidas en piezas de madera que están puestas en obra donde, en general, las testas no son accesibles. Se realizaron dos mediciones con ultrasonidos en ambas caras de cara a la opuesta, así como en el canto inferior o canto visto en obra.

iii) Obtención de perfiles con el resistógrafo.

El equipo empleado es un resistógrafo de la casa RIN TECH, modelo Resistograph Decon-professional ®3450 (Figura 2). Externamente el equipo está formado por dos partes: el dispositivo de recogida y almacenamiento de datos, y el sistema de accionamiento mecánico. Su funcionamiento se basa en la perforación de la madera a través de un dispositivo que contiene una aguja que al rotar se va introduciendo en la madera. La salida indica mediante una gráfica la resistencia a la penetración de la broca de 3 mm de diámetro en el extremo y de 1,25 mm la caña a lo largo de la longitud que penetre la broca.

El registro de datos se realiza tanto de forma gráfica en un papel de cera que con una

resolución de 0,1 mm es posible leer a escala 1:1 la fuerza ejercida por cada unidad de longitud, obteniéndose así un *perfil resistográfico* de cada ensayo que sale impreso en papel y se almacena de forma automática en la memoria del equipo (toma 1000 datos por milímetro de penetración).

Dado que no existe normativa que defina los ensayos de resistencia a la penetración mediante resistógrafo se procedió teniendo en cuenta la zona de mayor accesibilidad del elemento colocado en obra y por tanto el dato más fácil de obtener in situ. Se tomaron cuatro perfiles resistográficos de canto a canto de cada una de las viguetas evitando zonas con presencia de fendas, nudos, puntas...

iv) Ensayos en máquina universal.

Los ensayos de flexión se ejecutaron según la norma UNE-EN 408:2004 “Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas” y para ello se empleó la máquina universal de ensayos. Para la determinación del módulo de elasticidad global de canto a flexión (MOEGTO) se colocó el palpador en el canto de la pieza a ensayar.

Las variables de funcionamiento de la máquina para el ensayo se seleccionaron dependiendo del canto de la pieza a ensayar con la velocidad adecuada para que el ensayo se realice según la norma indicada anteriormente, una vez anotada la carga y la deformación del canto se retiró el palpador y el ensayo se continuó posteriormente hasta la rotura en un ensayo destructivo anotándose entonces el “módulo de rotura” o la resistencia a la rotura MOR.

iv) Ensayos no destructivos mediante el extractor de tornillos

El extractor de tornillos es un aparato que registrar la máxima fuerza aplicada para arrancar tornillos previamente introducidos en la madera. Se ha empleado un aparato de la marca húngara Fakopp que ha sido fabricado en acero por Kaliber MM Kf (Figura 3). Los parámetros que influyen en la resistencia al arranque de tornillos son muy variados, por lo que antes de realizar las mediciones hubo que decidir una serie de aspectos previos como:

- Diámetro del tornillo a utilizar
- Longitud de tornillo que debe introducirse (Figura 4)
- Definición de las zonas donde se deben realizar las mediciones
- Número de extracciones que deben hacerse por muestra

La elección del diámetro se hizo sobre los tornillos de 4 mm, ya que además de haber sido utilizados en un trabajo similar (DIVOS *et al.*, 1999) y ser los expresamente recomendados por el fabricante, los de 5 mm presentaban una serie de defectos, entre los cuales los más importantes eran las fuerzas más elevadas que había que aplicar y las dificultades en el arranque.

En relación a la longitud del tornillo puesto que venía definida por el modo en que habían sido realizados los tornillos suministrados por el fabricante, de modo que no se podía modificar y tan sólo se podía actuar sobre la profundidad de inserción. En este caso, se decidió introducir la parte inferior y media del tornillo, dejando tan sólo la parte superior en el exterior. De este modo se pretendía que la resistencia al arranque fuera ejercida por aquellas fibras situadas a una profundidad de entre 20 y 38 mm.

Las zonas sobre las que realizar las mediciones se eligieron fuera de la influencia de nudos, fendas u otras singularidades que pudieran afectar en los resultados del extractor de tornillos siguiendo también las recomendaciones del fabricante y comprobado que tanto nudos como fendas afectaban en los resultados.

Para determinar el número de extracciones se decidió tomar como referencia los resultados del estudio (WINANDY *et al.*, 1998), por lo que respetando las recomendaciones del mismo se estableció un total de 9 extracciones por vigueta. Las zonas que se eligieron para realizar los ensayos

fueron el canto inferior de cada muestra (zona de tracción), así como la parte inferior de cada una de sus caras. Esta elección coincide con las zonas más accesibles de las viguetas cuando éstas están puestas en obra, por lo que se logra así una mayor representatividad de los resultados.

v) **Determinación de la densidad y contenido de humedad.**

La densidad se determinó según lo dispuesto en la norma UNE-EN 408:2004 “Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas”.

La humedad se midió con las mismas probetas que se emplearon para el cálculo de la densidad y según lo dispuesto en la norma EN13183-1/AC:2004 “Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 1: Determinación por el método de secado en estufa”.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

En la tabla 1 aparece la estadística descriptiva de los resultados obtenidos en los distintos ensayos realizados. Según los resultados de los ensayos de flexión y densidad no resulta posible la asignación de una clase resistente según la norma UNE-EN 338:2003, ya que si bien la densidad y módulo de elasticidad da valores dentro de la citada norma no ocurre lo mismo con la resistencia a la flexión. El valor característico de la densidad (415 kg/m^3) situaría a las viguetas ensayadas en una clase C35 como la media de la especie al igual que ocurre con el módulo de elasticidad (10.113 N/mm^2) quedarían englobadas en una C22 coincidiendo con los resultados de HERMOSO *et al.* (2002 y 2003) con pino silvestre. Sin embargo, el valor característico de la resistencia a la flexión ($7,57 \text{ N/mm}^2$) es muy inferior a los que aparecen en la citada norma, de modo que ni siquiera es comparable con el de la peor clase resistente, aunque este dato debe ser tomado con precaución, ya que se trata de madera que puede haber sufrido daños no perceptibles durante su puesta en obra, en el transporte, descarga....

La velocidad de propagación de la onda ultrasónica es mayor cuando se calcula por el método directo que cuando esto se hace por cualquiera de los dos métodos indirectos, que a su vez presentan valores similares. El valor medio de la velocidad de propagación por el método directo es similar al de otros autores para la misma especie, según HERMOSO E. *et al* (2003) correspondería a una calidad C27 y según ESTEBAN M. (2003) correspondería a una clase C16 por resistencia a flexión y C22 por módulo de elasticidad. El método directo es mejor estimador del MOEGTO que el método indirecto para el empleo del ultrasonidos en obra es preferible aplicar la medida en la caras de forma cruzada que en el canto.

El análisis estadístico de los 158 perfiles obtenidos por el resistógrafo ofrecen un valor medio de la resistencia a la penetración de la broca, para las viguetas de pino silvestre objeto de este estudio, de 224,49 muy próxima a otros valores obtenidos por los autores del presente trabajo para la misma especie en madera puesta en obra. Existe correlación entre los resultados de resistencia a la penetración obtenidos bajo las condiciones de ensayo descritas y la densidad media de las viguetas calcula según norma UNE-EN 408:2004. Se puede estimar la densidad tomando como indicador el valor medio del perfil resistográfico empleando la siguiente fórmula:

$$y = 1,5079x + 152,83 \quad R^2 = 0,5612$$

Donde: y = valor medio de la densidad (Kg/m^3)
 x = valor medio del perfil del resistógrafo

La anterior función lineal de predicción de la densidad a través del resistógrafo es muy similar a la obtenida por otros autores para la misma especie (Mariño R., *et al* 2002).

En relación a los resultados con el extractor de tornillos es importante señalar que no hay

diferencias significativas en cuanto el ensayo se realice en la cara o en el canto, por otra parte el contenido de humedad no influye sobre la fuerza media de arranque realizada en ella con el extractor de tornillos, para los intervalos de humedad considerados en el presente estudio, es decir, entre el 8,5% y el 12,5%, rango de valores por otra parte frecuentes en madera puesta en obra.

El MOEGTO presenta una relación estadísticamente significativa con la fuerza media del extractor por vigueta, pero el bajo coeficiente de determinación logrado en el ajuste impide utilizar la ecuación obtenida para estimar el módulo de elasticidad a partir de la fuerza. Por otra parte el MORC y la fuerza media de arranque obtenida en cada vigueta no muestran una relación estadísticamente significativa. Por tanto la fuerza no se puede emplear, al menos por sí sola, como un estimador del MORC. Sin embargo se ha intentado establecer una relación entre el MORC y una variable conjunta formada por la resistencia al arranque y la velocidad de propagación, ya que se trata de dos variables independientes. No obstante, a pesar de haber logrado una relación estadísticamente significativa con un grado de confianza del 95%, el coeficiente de determinación obtenido en el ajuste fue muy bajo y por ello la ecuación asociada a dicho modelo no puede ser utilizada para estimar el MORC a partir de la resistencia al arranque y de la velocidad de propagación.

Se ha comprobado que existe una relación estadísticamente significativa entre la densidad media de las viguetas y la fuerza media de arranque obtenida en el canto, 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. La ecuación del modelo ajustado es la siguiente:

$$Densidad (g / cm^3) = \frac{1}{0,956276 + \frac{2,3611}{Fuerza\ canto (kN)}}$$

El coeficiente de correlación obtenido (r) es de 0,79, mientras que el coeficiente de determinación (r^2) resulta ser de 0,62. El p -valor de la tabla Anova indica que la relación entre las variables es estadísticamente significativa con un grado de confianza del 99%.

Los ensayos realizados para analizar la utilidad del extractor de tornillos como método de diagnóstico de madera puesta en obra, muestran que existen diferencias significativas entre los valores de fuerza obtenidos (Tabla 2). La fuerza asociada a una madera sana es, por término medio, un 85% mayor que la que se puede obtener en madera atacada. Los resultados obtenidos se explican por el hecho de que cuando el tornillo se introduce en una zona atacada, la resistencia al arranque la presentan fibras que se encuentran dañadas o en algunos casos (como ocurre con las galerías) ni siquiera hay fibras, de modo que la sección que ofrece resistencia se reduce y la lectura obtenida es por ello menor, mientras que cuando la madera está sana la lectura es mayor.

CONCLUSIONES.

El resistógrafo como método de análisis no destructiva en estructuras de madera en servicio, es de gran aplicación como técnica para predecir daños bióticos en zonas ocultas y de difícil acceso y como estimador de la densidad del elemento estructural tomando como indicador el valor medio del perfil resistográfico.

Los ensayos realizados con el extractor de tornillos indican que se puede utilizar con éxito como técnica de diagnóstico predictora de daños bióticos en la madera puesta en obra, ya que es capaz de detectar diferencias en la resistencia al arranque en función del estado de la madera, siendo de gran utilidad cuando esta no muestra indicios externos de su degradación. El MOEGTO (módulo de elasticidad global de canto a flexión) presenta una relación estadísticamente significativa con la fuerza media de arranque del extractor, pero el bajo coeficiente de determinación logrado en el ajuste impide la estimación con seguridad del módulo de elasticidad a partir de dicha fuerza. Se ha comprobado la existencia de una relación estadísticamente significativa entre la densidad media y la

fuerza media de arranque obtenida en el canto, 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. Asimismo se ha comprobado que para el rango de humedad media de las piezas de estudio (8 al 12%), está no influye sobre la fuerza media de arranque pero es necesaria la realización de ensayos con rangos de humedad más amplios.

Tabla 1. Cuadro resumen de las variables consideradas

VARIABLE	Nº de muestras	Valor característico	Media	Desviación estándar	Coefficiente de variación
Velocidad de propagación método directo	39	-	5119 m/s	413 m/s	8,07%
Velocidad de propagación método indirecto cara a cara	39	-	4396 m/s	981 m/s	22,31%
Velocidad de propagación método indirecto canto	39	-	4449 m/s	848 m/s	19,05%
Módulo de elasticidad global de canto (MOEGTO) a flexión	34	10113 N/mm ²	10113 N/mm ²	2760 N/mm ²	27,29%
Resistencia a la flexión estática (MORC)	34	7,57 N/mm ²	28,58 N/mm ²	11,56 N/mm ²	40,24%
Humedad	39	-	10,21%	0,68%	6,65%
Densidad	39	415 kg/m ³	491 kg/m ³	46 kg/m ³	9,30%
Resistencia a la penetración con resistógrafo	158	-	224,49	22,78	10,15
Resistencia media al arranque	39	-	2,33 kN	0,40 kN	14,57%
Resistencia media al arranque en el canto	39	-	2,27 kN	0,34 kN	14,88%

Tabla 2. Tabla ANOVA correspondiente a la resistencia al arranque (kN) frente al estado de la madera

ANOVA Table for Resistencia al arranque by Estado de la madera					
Analysis of Variance					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Between groups	49,5163	1	49,5163	203,07	0,0000
Within groups	37,308	153	0,243843		
Total (Corr.)	86,8244	154			



Figura 1. Método indirecto



Figura 2. Resistógrafo Decon-professional ®3450



Figura 3. Extractor de tornillos Figura 4. Tornillos de 3, 4 y 5 mm

Agradecimientos.

Este trabajo se engloba en un proyecto más amplio 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.

BIBLIOGRAFÍA.

- DIVOS, L.; NEMETH, L.; BEJÓ, L.: 1999. Evaluation of the wooden structure of a baroque palace in Papa, Hungary. Proc. of 11th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, pp 153-160.
- ESTEBAN HERRERO, 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. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes*. Universidad Politécnica de Madrid.
- HERMOSO, E; FERNÁNDEZ-GOLFÍN, J.I.; DÍEZ, R.; 2002. Madera estructural de pino silvestre: caracterización mecánica. *Revista de Investigación Agraria. Serie Sistemas y Recursos Forestales*. Volumen II (2).
- HERMOSO, E; FERNÁNDEZ-GOLFÍN SECO, J.I.; DÍEZ BARRA, M.R.; 2003. --Evaluación de la clasificación resistente de la madera estructural mediante ultrasonidos. *Actas del 10º Congreso Nacional de Ensayos no Destructivos*.
- MARIÑO R., FERNÁNDEZ, M^a., FERNÁNDEZ, C.; 2002. Análisis comparativo de la densidad de la madera de *Pinus sylvestris L.* Mediante la utilización de resistógrafo. *Revista CIS.Madera*. Nº 9, 2º Semestre. Pp 60-70.
- UNE-EN 338:2003. *Madera estructural. Clases resistentes*.
- UNE-EN 56544:2003. *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 uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas*.
- UNE-EN 384:2004. *Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad*.
- WINANDY, JERROLD E.; LEBOW, PATRICIA K.; NELSON, WILLIAM.;1998. Predicting bending strenght of fire-retardant-treated plywood from screw-withdrawal tests. Res. Pap. FPL-RP-568. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, *Forest Service, Forest Products Laboratory*