



Investigación de estructuras de madera en la rehabilitación estructural y conservación del patrimonio

Técnicas no destructivas.

Resumen

El presente artículo realiza una breve revisión de la metodología y técnicas disponibles para la Investigación y Diagnóstico de Estructuras de Madera en la Rehabilitación y Conservación del Patrimonio. Describe brevemente fundamentos y aplicaciones. Se centra en las técnicas más extendidas y da la referencia de algunas en estado de desarrollo que presentan un potencial de aplicación futura.

JAVIER YUSTE NAVARRO
ING.C.C.Y P. MSC
DTOR. UNIDAD TÉCNICA DE SEGURIDAD, AIDICO

DR. FILIPPO L. BOVIO
BOVIAR S.R.L
CONSIGLIERE AIPND
(ASOZIAZIONE ITALIANA PROVE NON DESTRUTTIVE)

Introducción

La investigación y conservación de estructuras precisa cada vez más de la técnica e instrumentación de apoyo para acceder al conocimiento de las características del producto construido, sean las propiedades de los materiales, la degradación, el comportamiento mecánico, los niveles de seguridad y las prestaciones de servicio de la estructura. En el caso de la rehabilitación del patrimonio, es necesario disponer de técnicas de inspección y auscultación no destructivas, que permitan acceder al conocimiento de los distintos elementos, afectando a éstos lo menos posible. Por otra parte, en la mayoría de los casos se presenta siempre un problema de accesibilidad a los distintos elementos o parte de ellos, o bien la imposibilidad de empleo de técnicas convencionales de extracción de muestras, por la propia incompatibilidad con los criterios de conservación asociados a los bienes culturales.

Las estructuras de madera presentan una particularidad específica, al tratarse de materiales de origen biológico sujeto a ataques de organismos que la degradan en el tiempo, junto con condicionantes de uso, como puede ser el caso de tener que inspeccionar e investigar el estado de elementos de madera de función ornamental (fig.1) por su valor histórico-artístico, y que además realizan una función estructural soportando determinadas cargas.

Las técnicas de investigación no destructiva, incluso con las limitaciones propias, constituyen una herramienta fundamental para el conocimiento del estado de las estructuras de madera y la toma de decisiones, sean de mantenimiento, detención de la degradación y mejora de las condiciones de conservación o intervención de consolidación y refuerzo.

Deterioro y degradación de elementos estructurales y técnicas de Investigación in situ

La degradación es inherente a los edificios históricos y puede producirse por ataque de insectos, hongos, pudriciones etc., si el elemento estructural no se sitúa en un ambiente seco y ventilado. El progreso indefinido del deterioro puede llevar al colapso total o parcial. Es por tanto necesario desde el punto de vista estructural evaluar el estado real de deterioro, detener el avance del mismo y prevenir la posible evolución futura. En muchos casos los elementos de madera están ocultos por fábricas, esencialmente los apoyos en muros de fábrica, que son los más vulnerables al ataque y degradación por las condiciones de humedad y falta de ventilación. No suelen ser accesibles a la vista y ciertas técnicas no destructivas de inspección permiten acceder a un conocimiento del estado de la madera en los puntos de apoyo.

Las técnicas de inspección y auscultación «in situ» acompañan determinadas inspecciones, sean rutinarias o de mantenimiento, o bien especiales sea por los síntomas que puedan apreciarse, presencia superficial de degradaciones, agrietamientos, deformaciones excesivas etc. (fig.2), o bien en el marco de intervenciones de adecuación y rehabilitación de un determinado edificio.

Las técnicas deben servir de ayuda al conocimiento del estado de deterioro así como a posibilitar el mismo en puntos de difícil accesibilidad visual, como a reducir las intervenciones de calicatas o destrucciones parciales de fábricas que ocultan la estructura de madera a investigar.

Cuando el ataque de organismos que producen degradación y deterioro no se manifiesta con síntomas externos, la evaluación es más dificultosa para los métodos más convencionales y la inspección visual, una serie de técnicas no destructivas «in situ» colaboran al conocimiento de los aspectos siguientes:

- Detección de la presencia de organismos destructores e identificación de los mismos
- Evaluación del grado y extensión del ataque, cuantificando en lo posible el estado del elemento
- Evaluación de las condiciones ambientales, en especial la humedad.
- Evaluar la afección a la estructura y la pérdida de capacidad portante



Identificación de la Especie

Es indispensable la identificación de la especie de madera ya que con ellas varían las características físico-mecánicas, durabilidad y de defectos de la madera. La identificación puede realizarse con la inspección visual y con examen al microscopio óptico de pequeñas micro-probetas extraídas de la pieza.

Medida de la Humedad

La determinación de la humedad en la madera y el ambiente es un aspecto esencial por la influencia de la misma en el desarrollo de hongos xilófagos, cuando la humedad de equilibrio se mantenga durante periodos prolongados por encima del 20%. También por los cambios de volumen de las piezas y por la influencia de la humedad en las características mecánicas.

El empleo de higrómetros (fig.6) que introducen electrodos en la madera y miden a distintas profundidades, permite detectar gradientes de humedad hasta 5-6 cm. de profundidad en la misma sección. Otra alternativa es el higrómetro capacitivo, que funciona por contacto en la superficie, pero con menor capacidad de penetración. La precisión de estos equipos es en general suficiente para los valores medios de humedad de la madera (4-28%).

Técnicas No Destructivas

Lo que consideramos como técnicas no destructivas requiere una distinción entre ellas en relación con la modalidad de aplicación de la técnica. Podemos considerar dos tipos en esencia de Pruebas No destructivas, unas de tipo global y otras de tipo local.

a) Técnicas de Exploración de tipo Global

a.1 Propagación de ondas elásticas.

Métodos Sónicos y Ultrasónicos

Las ondas elásticas se generan en la superficie del elemento sujeto a exploración, normalmente mediante impacto con martillo para el método sónico (fig.7) e impulsos con el método ultrasónico.

La diferencia de uno u otro sistema radica esencialmente en la diferencia de la frecuencia de excitación mayor en el campo ultrasónico ($f=20$ KHz) Estas ondas se propagan por el medio a una velocidad y se reflejan en la superficie del elemento, en anomalías internas y en los vínculos de contorno con otros materiales. La ubicación de emisores y receptores a determinadas distancias permite medir el tiempo de propagación y, por tanto, la velocidad de propagación de la onda. La velocidad de propagación siempre es superior en la madera sana que en la degradada, y la construcción de imágenes digitales de distribución de velocidades mediante tomografía en distintas secciones, permite localizar las áreas con degradación potencial. Cabe indicar que la velocidad de propagación, debido a la propia estructura del material de la madera, es una velocidad aparente, ya que la transmisión se produce de forma distinta de una fibra a otra. La técnica se aplica midiendo el tiempo de propagación de forma incremental en diversas posiciones a lo largo del elemento.

La velocidad de propagación de una onda elástica de compresión depende de las características elásticas del material como el modulo de Young y el coeficiente de Poisson, con la relación siguiente planteada de forma simplificada:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad E = \rho \cdot v^2$$

$$v = \frac{d}{t}$$

v : velocidad de propagación

E : módulo de elasticidad dinámico

ρ : densidad del medio

Para un elemento viga se obtiene a partir de la distancia de entre la posición del emisor y el receptor, siendo t el tiempo de propagación medido. La determinación del módulo de Elasticidad Dinámico del material, se puede relacionar con otras propiedades mecánicas, empleando correlaciones de base estadística. Otro aspecto es la fiabilidad de los valores del modulo elástico obtenido y el mejor método va ligado en la práctica a lecturas de tiempo de propagación en sentido longitudinal al elemento y, en ocasiones, no va a ser posible acceder a los extremos del elemento, por ejemplo por presencia de empotramientos en muros de fábrica. En estos casos las lecturas deben realizarse de forma indirecta o superficial, actuando sobre una cara del elemento y, por tanto,, pueden alterarse por condiciones particulares de la masa superficial del elemento. Para el caso de empleo en madera no dan una eficiencia adecuada los transductores de contacto plano por las condiciones de la superficie, se suelen emplear transductores de aguja o bien de punta cónica como el caso del CMS (fig.9).

Muchos más aspectos teóricos y prácticos sobre la aplicación e interpretación de estas técnicas, sobre transmisión, atenuación de señales etc., son de interés, no siendo posible una extensión mayor por alcance del artículo.

a.2 Métodos Dinámicos.Vibraciones

Existen muchas líneas de investigación que han desarrollado el empleo de métodos dinámicos con vibraciones para evaluar materiales y estructuras. En estructuras, desde un punto de vista general, el fundamento es la obtención de la respuesta dinámica de la estructura, en especial las frecuencias propias de vibración. Estas frecuencias se obtienen mediante el registro de vibraciones inducidas en la estructura o en un

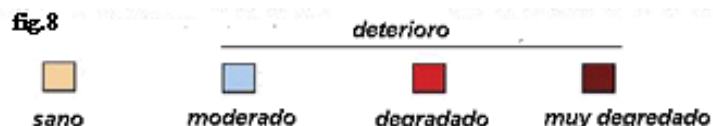
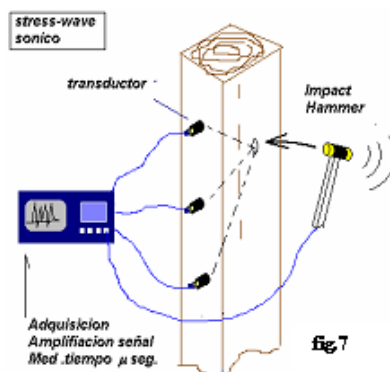
elemento estructural, sea mediante oportunos equipos o bien registrando vibraciones de tráfico de vehículos, viento, etc., disponiendo una serie de sensores acelerométricos en diferentes puntos de la estructura. Tras el tratamiento de los registros es posible obtener las características dinámicas de la estructura, como son los modos fundamentales de vibración y el amortiguamiento. La teoría se basa en que toda estructura tiene una frecuencia propia cuando vibra, y el alejamiento significativo de ésta respecto de la frecuencia propia teórica es una clara indicación de pérdida de integridad y posible degradación en la misma. Es obvio por tanto que precisa un modelo de ordenador mediante Elementos Finitos de la estructura, de forma paralela para evaluar la respuesta teórica y la desviación de la experimental.

El análisis de vibraciones se ha empleado en general para detectar presencia de daños en vigas, comparando la respuesta experimental con la teórica, ya que en un elemento tipo viga es relativamente sencillo. En este caso, es suficiente el control de los tres primeros modos de vibración para determinar la extensión de daños y degradación. Esta técnica puede ser empleada de forma sencilla para la evaluación de vigas de madera, resultando compleja para estructuras mayores. Existen referencias de algunas aplicaciones en este sentido que se han estudiado en puentes de madera en Estados Unidos bajo el auspicio de la FHWA (Federal Highway Administration).

a.3 Propagación de ondas electromagnéticas. Microondas-Antenas Radar.

Las técnicas de inspección de microondas y longitud de onda milimétrica analizan la propagación de ondas electromagnéticas en materiales dieléctricos generadas por antenas con frecuencias entre 300

MHz y 300 GHz. Se emplean antenas dobles de transmisión, con antena receptora y emisora, y antenas simples de reflexión con una antena simple transmisora-receptora. El radar GPR es un caso típico de estas últimas. La utilización de técnicas de microondas en la madera está siendo investigada para evaluar el contenido de humedad, la densidad, el ángulo de las capas, etc. Las ondas electromagnéticas son muy sensibles



a la variación de humedad y por tanto existe un potencial desarrollo de la aplicación de estas técnicas para la evaluación del deterioro en estructuras de madera antiguas.

b) Técnicas de Exploración de tipo Local

La variación de las propiedades de una estructura de madera se presenta de un elemento a otro, y en el propio elemento como consecuencia de la propia heterogeneidad del material así como de la presencia de defectos, anomalías y degradación. Por ello la obtención de medidas de parámetros a nivel local debe evaluarse en este contexto, y deben comprenderse como medidas singulares no pudiendo generalizarse a toda la estructura si no se establece un adecuado muestreo estadístico, que excluya lógicamente las zonas de anomalías o con madera deteriorada por ataques biológicos u otros factores de afección a la zona, que pudiesen modificar las características propias del material.

b.1 Medida de la dureza superficial

El sistema mas conocido es el instrumento denominado **Pilodyn**, que en esencia es similar a los esclerómetros que se emplean en el hormigón. El aparato dispara un punzón cilíndrico contra la superficie de la madera (fig. 10), con energía constante, midiendo la profundidad de

penetración. Dicha profundidad está correlacionada y calibrada con datos experimentales de las propiedades mecánicas y se puede establecer una estimación de las propiedades del material.



b.2 Resistencia a la perforación.

Resistograph

Esta es una de las técnicas de mayor utilización, por su sencillez y porque permite acceder a la respuesta interior de la masa de un determinado elemento estructural.

Se trata de un trépano perforador instrumentado que permite medir la resistencia a la perforación, que se estima de manera indirecta en función de la energía empleada para conseguir un avance en la perforación a velocidad constante. El vástago perforador tiene un diámetro de 1.5 a 3 mm, según la profundidad de perforación (200 a 400 mm en los modelos usuales).

El trépano perforador va conectado a una centralita de adquisición (fig. I 1) que produce un registro continuo de la medida de la resistencia a la perforación (fig. I 2). Los perfiles obtenidos en la madera siguen un trazado característico de la especie de madera que se trate. A través de éstos son detectables las zonas afectadas y degradadas por ataques biológicos, siendo suficiente la técnica a los efectos de una exploración estructural. Como la perforación es muy pequeña se pueden hacer diversas perforaciones en el entorno y acotar más el área deteriorada.

En general puede usarse en muchos en los que las otras técnicas no son eficaces, por ejemplo para investigar el estado de los apoyos no accesibles en los muros de fábrica (fig. I 3).

En la mayor parte de los instrumentos esta técnica es capaz de detectar muy bien la degradación por pudrición, pero es menos exacta en la detección de ataques de insectos xilófagos si éste no es suficientemente fuerte.

Conviene también indicar que el uso de aparatos con mayor densidad de muestreo permite estimar los espesores de los anillos de crecimiento (fig. I 4).

Es conveniente resaltar que las medidas no son establecidas en unidades que respondan a parámetros físicos o de propiedades mecánicas,

la resistencia a la perforación es un valor convencional que permite indirectamente la estimación de anomalías y áreas degradadas.

En cuanto a la posibilidad de estimar propiedades mecánicas del elemento investigado, por el momento es puramente teórica. No existen datos de correlaciones fiables al respecto, disponiendo de algunos datos de experimentación dispersos y con dificultades en una aplicación más o menos general.

Esta relación además se daría de forma indirecta, a través de la densidad de la madera, y la correlación de ésta con las características mecánicas, teniendo en cuenta que las dimensiones de los elementos reales estructurales no es verificable. No obstante, ello es la técnica más sencilla y versátil para evaluar la degradación de elementos de madera.

b.3 Medidas sobre micro-probetas

Otra de las técnicas es la extracción de pequeñas probetas (micro-probetas) cilíndricas, con las que se puede realizar un examen visual cualitativo (aspecto, degradación, color etc.) o bien cuantitativo mediante un equipamiento especial.

El equipo de extracción más sencillo es la broca de **Pressler**, que permite extraer manualmente micro-testigos. Para disponer de datos estimativos de las propiedades mecánicas, siempre que las muestras no estén dañadas por el propio proceso de extracción o por condiciones de degradación, puede emplearse un equipamiento pequeño que permite realizar pruebas de compresión y de flexión sobre micro-probetas (fig. I 5), instrumento «**Fractometer**».

b.4 Técnicas ultrasónicas aplicadas de forma local

Se ha indicado anteriormente la dificultad, en la mayor parte de los casos, de realizar medidas ultrasónicas de forma longitudinal para la estimación «global» de la velocidad de

propagación de la onda ultrasónica y el módulo elástico en una pieza.

La forma de utilización puede efectuarse de forma «local» con medidas puntuales de la velocidad de propagación de los impulsos ultrasónicos, en dirección perpendicular a la directriz (fig. I 6), y por tanto a las fibras.

La aplicación de transductores se realiza de forma directa en ambas caras del elemento. Con lecturas en diversos puntos del elemento puede construirse la distribución de velocidades. Los valores muy bajos de velocidad pueden constituir indicio de degradación. El empleo de valores tabulados experimentales de velocidad o tiempo de propagación en dirección ortogonal a las fibras en diferentes tipos de madera puede ser una referencia de ayuda en la realización de pruebas con ultrasonidos. Lógicamente, esta técnica sólo resulta aplicable en las partes accesibles de los elementos.

Conclusiones

La inspección y el diagnóstico de las estructuras de madera en la rehabilitación, precisa de una serie de pruebas e instrumentos específicos, muchos de ellos derivados de la tecnología forestal y que pueden ser de gran utilidad en el caso de elementos estructurales, sobre todo en los puntos críticos a los que no es posible acceder. Las técnicas más comunes que completan la inspección visual, las sónicas y ultrasónicas, la resistencia a la penetración, dureza superficial y extracción de micro-probetas, permiten obtener una información cualitativo-cuantitativa que puede cubrir la mayor parte de las necesidades que se presentan en la rehabilitación estructural, en concreto, la utilidad de detectar las degradaciones y las secciones residuales de los elementos estructurales de madera. Las limitaciones propias de cada técnica e instrumento hacen conveniente no limitarse al uso de una



estructuras

exclusiva técnica, y la complejidad de los resultados precisa de una interpretación experimentada y prudente que evite conclusiones incorrectas.

Queda, como en la mayor parte de las técnicas no destructivas que se emplean en otros materiales, la dificultad de extrapolar de ellas valores directos de propiedades mecánicas del material o de los elementos, y, no obstante ello, sirven de apoyo en contraste con datos y tablas procedentes de investigación experimental, a un juicio técnico adecuado y realista.

Bibliografía

Macchioni, M., L.Bovio, F. «Metologie Diagnostiche su Strutture di Legno», CNR- 2003.

Ross, R.J & others. «Inspection of Timber Bridges Using Stress-Wave Timing. Non Destructive Evaluation Tools» FHWA-FPL-GTR-14-1999.

G.Bonamini, L.Uzielli, A.Cecotti. «Sulla Valutazione della Resistenza Meccanica del Legno Antico» Congreso CTE Tecnologia edilizia in evoluzione - Bologna, 1990.

R.N Emerson & others. «Nondestructive Evaluation Techniques for Timber Bridges» 2003.

Brashaw B.K & others. «Evaluation of a Micro-drilling Resistance Tool». FPL-GTR-159 USDA-2005.

Hunt, M.O, R. J Ross, X.Wang & others. «Low frequency vibration approach for Assessing performance of Wood floor systems». Wood & Fiber Sci.37(3): 371-378.

Lourenzo P. B. «Selected case Studies for Ancient Portuguese Timber Structures».

Dep.Of Civil Eng. University of Minho- 2005.

Simonelli F, Trole, R. «Diagnosi dello Stato di Conservazione delle Strutture Lignee con il Resistograph». 2005 