



Received: 03/10/2021

Accepted: 14/10/2021

Anales de Edificación

Vol. 8, Nº2, 57-62 (2022)

ISSN: 2444-1309

Doi: 10.20868/ade.2022.5044

Inspección no destructiva de estructuras de madera mediante métodos acústicos. Casos prácticos de aplicación en edificios patrimoniales

Non-destructive inspection of timber structures using acoustic methods. Case studies of application in heritage buildings

Elisabet Suárez Vargas^a, Francisco José Rescalvo Fernández^a, Carlos Cruz Rodríguez^a, Antolino Gallego Molina^a

^aUniversidad de Granada

Resumen-- La madera, muy presente en estructuras de edificios patrimoniales, es un material de gran vulnerabilidad ante escenarios adversos (humedad y xilófagos, fundamentalmente). Durante la inspección de las estructuras de madera para decidir si es necesario realizar una intervención y conservación de esta, se debe diagnosticar su estado atendiendo a distintos parámetros, respetando la legitimidad del monumento de ser conservado. Este trabajo presenta una metodología de inspección no destructiva basada en métodos acústicos con el objetivo de tomar decisiones inteligentes de intervención. En concreto, se estudia la detección de xilófagos activos en la madera mediante la técnica de emisión acústica y la determinación de las características resistentes de las vigas mediante inspección por ondas elásticas para la obtención del módulo elástico y asignación de una clase resistente según la norma UNE-EN 338:2016. Además, se presentan ejemplos de aplicación en edificios patrimoniales incluyendo la clasificación visual para detección de patologías y la asignación de clases resistentes según la norma UNE-EN-56544, y el análisis estructural mediante modelado numérico.

Palabras clave— Madera; Patrimonio; Rehabilitación; Inspección No Destructiva; Xilófagos.

Abstract— Wood, which is very present in the structures of heritage buildings, is a material that is highly vulnerable to adverse scenarios (mainly damp and xylophages). During the inspection of wooden structures to decide whether an intervention and conservation of the structure is necessary, its condition must be diagnosed according to different parameters, respecting the legitimacy of the monument to be conserved. This work presents a non-destructive inspection methodology based on acoustic methods with the aim of making intelligent intervention decisions. Specifically, it studies the detection of active xylophages in wood using the acoustic emission technique and the determination of the strength characteristics of beams by means of elastic wave inspection to obtain the elastic modulus and assign a strength class according to the UNE-EN-338:2016 standard. In addition, examples of application in heritage buildings are presented, including visual classification for the detection of pathologies and the assignment of strength classes according to UNE-EN-56544, and structural analysis by means of numerical modelling.

Index Terms— Wood; Heritage; Rehabilitation; Non-Destructive Inspection; Xylophagous.

I. INTRODUCCIÓN

La madera, material muy utilizado en edificaciones históricas, es de gran vulnerabilidad ante escenarios adversos (Arriaga et al., 2002). Durante el análisis de las estructuras de madera para decidir si es necesario realizar una intervención y conservación de esta, se debe diagnosticar su

estado atendiendo a distintos parámetros, respetando la legitimidad del monumento de ser conservado. La intervención debe hacerse siguiendo unos protocolos basados en el conocimiento científico aplicado a la práctica restauradora y conservadora (Palma et al., 2020).

El trabajo presentado surge de una necesidad real del sector de la rehabilitación y restauración de edificios con estructura de madera. Para decidir el plan de actuación ante una rehabilitación de un edificio con estructura de madera es imprescindible conocer el estado de dichos elementos, tanto en términos de presencia de xilófagos, como en términos de capacidad resistente de los elementos de madera que influyen en la seguridad estructural del edificio.

El daño generado por la presencia de xilófagos principalmente carcoma y termitas, puede generar graves desperfectos e importantes pérdidas de la capacidad resistente de la madera, incluso la pérdida total de resistencia (Figura 1). La norma UNE 41085- 8:2009 (Diagnóstico de edificios. Parte 8: Estudio patológico de la estructura del edificio. Estructuras de madera) (AENOR, 2009) incluye entre los procesos físicos de degradación del material, el ataque biótico, y entre ellos los insectos xilófagos coleópteros como insectos de ciclo larvario e insectos xilófagos isópteros como insectos sociales.

Además, la UNE 56418:2016 (Protocolo de actuación en cascos urbanos afectados por ataques de termitas subterráneas) (AENOR, 2016) califica el problema de las termitas subterráneas como un problema de ámbito global de toda la municipalidad, e implica a los ayuntamientos a establecer protocolos y mecanismos para poner solución global a la plaga. Se debe establecer un plan de acción que permita:

- Evaluar la magnitud de la plaga -su extensión- mediante la realización de un estudio.
- Realizar un tratamiento mediante el sistema de cebos que permita su completa eliminación.

Su detección temprana es, por tanto, de vital importancia para actuar con celeridad en su tratamiento y minimizar los daños. Actualmente, los principales métodos de detección de xilófagos se basan en una inspección visual para detectar los túneles que forman estos insectos o comprobar mediante el golpeo que no se produce un sonido hueco. Estos dos procedimientos, además de subjetivos e imprecisos, presentan el inconveniente de no poder distinguir si las galerías se deben a un problema actual o del pasado. Asimismo, la inspección visual requiere un elevado consumo de tiempo y solo puede realizarse en las caras accesibles de la viga, a veces ocultas por otros materiales.



Fig. 1. (a) Ataque de termitas detectado en una vivienda particular en Albuñuelas (Granada); (b) Obras destinadas a sustituir las vigas dañadas.

En este sentido, la metodología propuesta en este trabajo se basa en la técnica de emisión acústica, la cual permite detectar la presencia de larvas activas de xilófagos, en menos tiempo, con más eficacia y de forma más temprana (Robbins et al., 1991). El método de emisión acústica permite monitorizar las estructuras en tiempo real, y es capaz de detectar una deformación plástica, una fractura o cualquier fenómeno que esté ocurriendo en el material que genere una variación en el campo de deformaciones (Gallego et al., 2015). Este es el caso de la existencia de xilófagos en fase activa en una viga de madera. La técnica, a diferencia de otras técnicas convencionales que trabajan en el rango audible, trabaja en el rango no audible de los ultrasonidos, a partir de 20 kHz. Las larvas, al comer y remover material producen una onda elástica ultrasónica que se transmite por el material y puede ser captada mediante un transductor piezoeléctrico situado en la superficie, que la convierte en una señal eléctrica. Tras un análisis de datos adecuado y en tiempo real, es posible obtener información sobre la existencia de larvas.

Otro problema importante que se plantea ante una intervención es conocer las características resistentes de los elementos puestos en obra. La decisión de mantenerlos o sustituirlos en base a sus propiedades elásticas y resistentes presenta unas implicaciones trascendentales en términos de coste económico, plazos de ejecución, alcance de la intervención y sostenibilidad ambiental.

En edificios patrimoniales, en el momento en el que se instalaron los elementos estructurales de madera no existían normas estructurales ni métodos de clasificación de la madera en base a su clase resistente, de ahí que muchos fueron instalados sin la suficiente resistencia para las solicitaciones esperadas. Además, el paso de los años, con el deterioro y cambio de uso, han podido ir variando su clase resistente.

La metodología acústica presentada en este trabajo permite determinar la clase resistente de la viga en su ubicación, permitiendo decidir de una forma científica sobre si mantiene una capacidad portante apta para ser operativa (Arriaga et al., 2002) (Bucur et al., 1984). La norma UNE 41085-8:2009 (Diagnóstico de edificios. Parte 8: Estudio patológico de la estructura del edificio. Estructuras de madera) (AENOR, 2009) incluye la técnica de ultrasonidos por transmisión como un método NDT para comprobar el módulo de elasticidad dinámico, a partir de la velocidad de las ondas y de la densidad del material.

En este contexto, este trabajo, con el objetivo de tomar decisiones inteligentes de intervención, presenta una inspección no destructiva para determinar la presencia activa de xilófagos en la madera mediante la técnica de inspección acústica y la determinación de las propiedades resistentes de las vigas mediante una inspección por ondas elásticas para la obtención del módulo elástico y la asignación de una clase resistente según la norma UNE-EN 338:2016 (AENOR, 2016). Se incluye también la clasificación visual para detección de patologías y la asignación de clase resistentes según la norma UNE EN 56544 (AENOR, 2011), así como el análisis estructural mediante modelado numérico.

II. METODOLOGÍA

A. Detección de larvas activas de xilófagos mediante la técnica de emisión acústica

Se ha realizado la inspección mediante la técnica de emisión acústica, utilizando un equipo portable de Vallen Systeme® y sensores de ultrasonidos que actúan como receptores de las ondas acústicas generadas por la actividad de los xilófagos, en torno a la frecuencia de 150 kHz, y un equipo de registro portable (Figura 2). La actividad registrada por el equipo es transmitida a un software de análisis que permite evaluar su amplitud, energía, periodo de ocurrencia y contenido en frecuencia, entre otras variables. Se prioriza el estudio de las zonas consideradas vulnerables y se realizan medidas en distintos puntos del elemento a analizar.



Fig. 2. Experiencias previas en detección de xilófagos con emisión acústica: (a) Cubierta de la Sala Dos Hermanas del Patio de los Leones de la Alhambra; (b) Vivienda unifamiliar situada en Albuñuelas (Granada).

B. Inspección por ondas elásticas para obtención del módulo elástico dinámico y asignación de clase resistente de cada elemento según norma UNE-EN 338.

Para la realización del ensayo no destructivo se emplean dos sensores acústicos (emisor y receptor), un osciloscopio como equipo de registro directo de ondas elásticas generadas por impacto en el sensor emisor y un ordenador de control y registro. Los sensores se colocan en sentido longitudinal, a una distancia conocida y con un ángulo de inclinación determinado (Fig. 3).

Al golpear el sensor emisor, la onda elástica se propaga por el material hasta ser captada por el sensor receptor. Conocida la distancia entre el emisor y el receptor y determinando el tiempo de llegada de la onda al receptor mediante algoritmos apropiados (Rescalvo et al., 2019), se determina la velocidad de la onda. Conocida la velocidad de la onda (v) y la densidad del material (ρ) obtenida mediante una micro-cata extraída por barrena, se calcula el Módulo de Elasticidad Dinámico

$$E_{dyn} = \rho \cdot v^2 \quad (1)$$

(MoEdyn) (1):

A continuación, se le aplica una corrección por humedad según la norma UNE-EN 384:2016+A1 (AENOR, 2020) y una fórmula de paso para obtener el Módulo de Elasticidad Estático (M_oE , $E_{m,0,mean}$). El valor del M_oE y la densidad permiten asignarle a la pieza una Clase Resistente según la norma UNE-EN 338:2016 (AENOR, 2016).

Además, esta técnica también permite detectar zonas degradadas con presencia interna de galerías, orificios o serrín, midiendo la velocidad de propagación de la onda en sentido transversal al elemento estructural.

C. Inspección y clasificación visual para detección de patologías y la asignación de clases resistentes según la norma UNE EN 56544

Siguiendo la norma UNE-EN 41805-8 (AENOR, 2009), Apartado 5.2. Procesos patológicos y lesiones en las uniones, se debe realizar una inspección tanto de los procesos patológicos como sus causas y síntomas constructivos siguiendo los siguientes puntos cuando sea oportuno:

- Procesos físicos. Degradación del material (Ataque biótico y abiótico)
- Procesos mecánicos. Patología de origen estructural (Singularidades en la madera, deformaciones, roturas, capacidad mecánica residual insuficiente y arriostamiento insuficiente)
- Lesiones en las uniones (Lesiones por degradación del material y lesiones mecánicas)

Por ello, también se realiza una clasificación visual de cada elemento siguiendo la norma UNE:EN 56544:2011 para madera de coníferas, midiendo, entre otros parámetros, las dimensiones en 5 secciones, el contenido de humedad, la densidad, nudos, fendas, acebolladuras, gemas y desviación de la fibra.

La norma establece unos criterios de aceptación o rechazo según el ancho de la pieza (b):

- $b < 70$ mm: Clases ME-1, ME-2 o Rechazo (Tabla 2 – UNE-EN 56544:2011)
- $b > 70$ mm: Clases MEG o Rechazo (Tabla 3– UNE-EN 56544:2011)

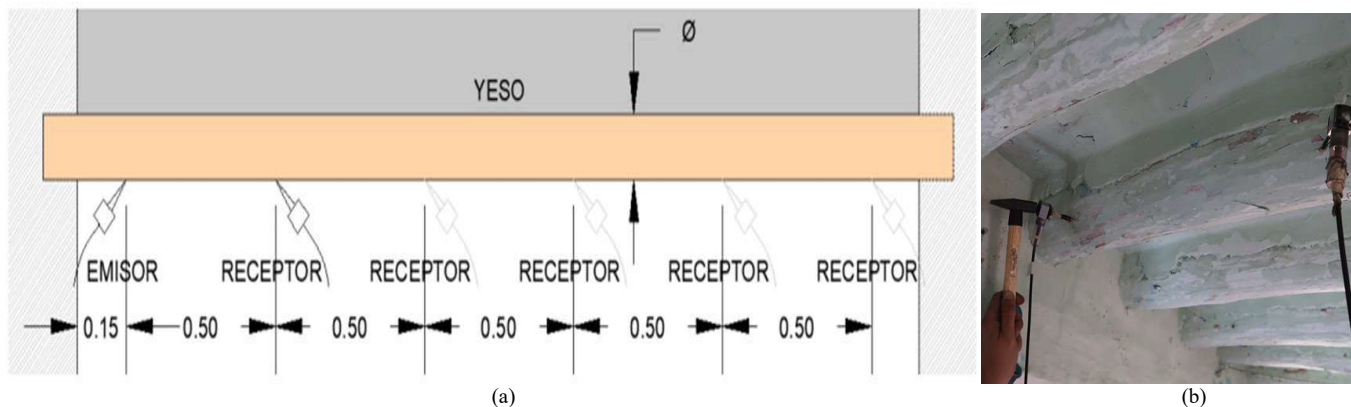
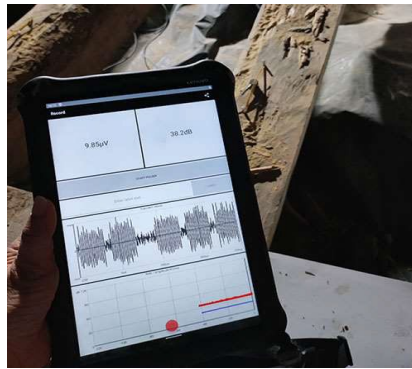


Fig. 1. Ensayo de UT en sentido longitudinal: (a) Esquema experimental; (b) Ensayo realizado en obra.



III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se muestran en este apartado los resultados obtenidos en varias inspecciones en obras in situ.

A. Detección de larvas activas de xilófagos mediante la técnica de emisión acústica

La técnica de emisión acústica ha demostrado ser aplicable para la detección de presencia activa de xilófagos en varias inspecciones realizadas. En varias ocasiones se ha detectado actividad de emisión acústica relacionada con presencia activa de xilófagos (Figura 4b) y al realizar una inspección visual del elemento afectado, se detectó serrín actual y huevos de xilófagos (Figura 4c).

En la inspección de una vivienda unifamiliar en la que había una plaga de termitas de forma visible (Figura 1a), se detectó actividad de emisión acústica en otras zonas donde no se habían detectado por métodos convencionales. También se aplicó este método para comprobar que las termitas habían desaparecido después del tratamiento para su eliminación.

B. Inspección por ondas elásticas para obtención del módulo elástico dinámico y asignación de clase resistente de cada elemento según norma UNE-EN 338

En el caso de estudio 1, se analizaron 16 vigas de un edificio histórico situado en Granada, con una sección aproximada de 210 x 300 mm² y una luz de 6.81 m, biapoyadas en los muros laterales, realizando en ensayo de inspección por ondas elásticas longitudinal en todas ellas. Se obtuvieron valores de MoE entre 5900 y 8507 MPa, siguiendo una distribución normal (Figura 5a). La Figura 5b muestra la distribución de

clases resistentes de las 16 vigas analizadas, siendo un 56% clasificadas como Rechazo, un 37% como C14 y solo una de ellas como C16.

En el caso de estudio 2 se analizaron dos vigas de cinco forjados diferentes, 4 de ellos compuestos por madera de chocho en rollo (F1-F4), como se muestra en la Figura 6, y el quinto forjado compuesto por madera aserrada de pino. Teniendo en cuenta la densidad y el módulo elástico, se obtuvo una clasificación resistente de, al menos, C16 según la norma UNE-EN 338 (AENOR, 2016), asociada a un MoE de 869 MPa. Solo en una de las vigas se obtuvo un MoE de 13079 MPa, asociado a una clase resistente C35. Es importante destacar, que, debido a la heterogeneidad intrínseca de la madera, los resultados obtenidos deben ser considerados como evaluación de elementos individuales, no siendo una muestra estadísticamente representativa como para ser considerados valores medios de los forjados.

C. Inspección y clasificación visual para detección de patologías y la asignación de clases resistentes según la norma UNE EN 56544.

En el caso de estudio 1, tras la inspección visual de las vigas se detectaron diversas patologías. La Figura 7 muestra la medición de un nudo y de una fenda en una de las vigas. A modo de ejemplo, la Tabla 1 muestra un resumen de los resultados de 3 de las vigas. El 100% de las 16 vigas analizadas en este caso fueron clasificadas según la norma UNE EN 56544 (AENOR, 2011) como Rechazo, con distintas causas principales de rechazo, siendo las más comunes gemas y nudos.

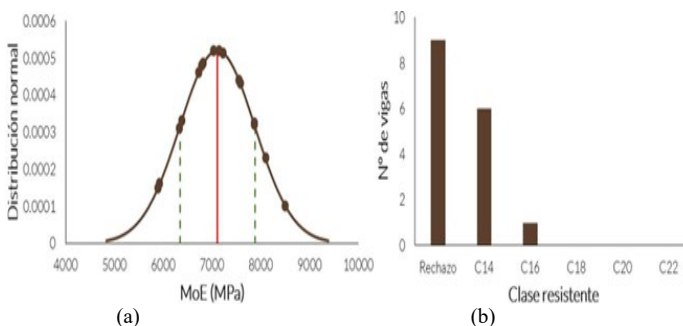


Fig. 5. Caso de estudio 1. (a) MoE de cada una de las vigas ajustadas a una distribución normal. Roja: valor medio. Verde: desviación estándar; (b) Distrib. del Nº de elementos según su clase resistente (UNE EN 338:2016).

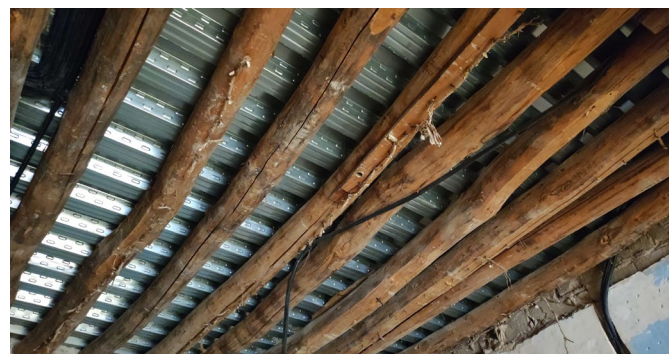


Fig. 6. Vista de uno de los forjados compuesto por madera de chocho en rollo. Caso de estudio 2.



(a)



(b)

Fig. 7. Caso de estudio 1. (a) Medición de un nudo en una viga; (b) Medición de fendas

D. Análisis estructural mediante modelado numérico

Para completar los resultados mecánicos obtenidos mediante ensayos acústicos, se realizó un análisis estructural mediante un modelado numérico. En el caso de estudio 1, se ha empleado el programa Dlubal RFEM® 5.27. En la elaboración del modelo se han tenido en cuenta los siguientes datos:

- Los valores de MoE y densidad individuales de cada viga.
- Los cambios de sección, medidos en 5 puntos equidistantes de cada viga.
- Que las vigas antes cargas superficiales actúan en conjunto (ksys) y no de forma individual. El modelo no incluye:
 - La flecha que las vigas presentan actualmente.
 - La pérdida de sección que producen las gemas.
 - La presencia de grietas.
 - La pérdida de material causada por la presencia de carcoma.

Las combinaciones de carga empleadas en el cálculo siguen el CTE DB-Seguridad Estructural – Acciones en la edificación, adoptando unos valores de:

- CC1: Peso propio = 0,80 kN/m²
- CC2: Sobrecarga de uso (oficinas) = 2 kN/m²
- CC3: Sobrecarga de uso puntual = 2 kN

Las vigas se han comprobado a Estados Límites Últimos (ELU), Estados Límites de Servicio (ELS) y Resistencia al fuego. La Tabla muestra el resumen de los resultados más desfavorables para ELU, ELS y Resistencia al fuego de 3 de las vigas analizadas. El 100% de las vigas no cumple las exigencias de ELS, 3 de ellas no cumplen la Resistencia a fuego exigidas y 2 tampoco cumplen para ELU. La Figura 8 muestra el diagrama de los resultados de la Resistencia al fuego para todas las vigas.

Estos resultados son coherentes con la inspección y

clasificación visual, en el que todas las vigas también se clasificaron como Rechazo. Según el módulo elástico, más del 50% de las vigas también se clasificaron como Rechazo y el resto con clase C14 y C16, clases relativamente bajas para fines estructurales.

TABLE II
 RESUMEN DE RESULTADOS MÁS DESFAVORABLES PARA CADA COMBINACIÓN DE CARGA DE 3 VIGAS. CASO DE ESTUDIO 1.

| Viga | ELU | ELS | | | Resistencia al fuego |
|------|------|------------|---------|------------|----------------------|
| | | Integridad | Confort | Apariencia | |
| 2 | 1.24 | 1.88 | 1.04 | 1.38 | 2.53 |
| 6 | 0.91 | 1.92 | 1.09 | 1.37 | 0.74 |
| 15 | 0.95 | 1.88 | 1.07 | 1.31 | 0.99 |

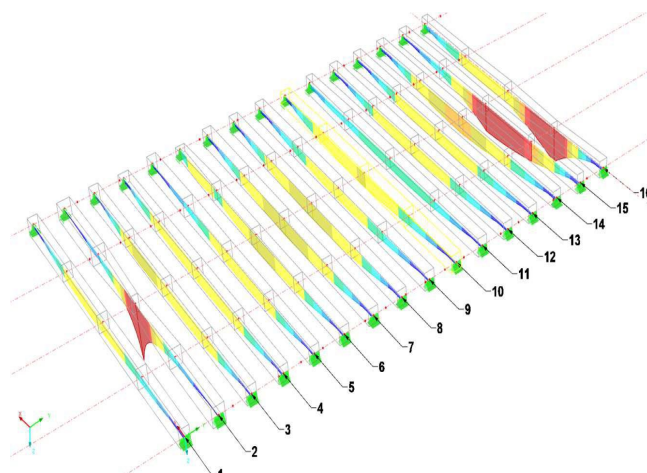


Fig. 8. Diagrama de Resistencia al fuego de las vigas del caso de estudio 1.

TABLE I
 RESUMEN DE RESULTADOS DEL ANÁLISIS VISUAL DE 3 VIGAS. CASO DE ESTUDIO 1.

| Viga | H (%) | Patologías detectadas | CR (UNE -EN- 56544) | Causa de rechazo |
|------|-------|---|---------------------|------------------|
| 2 | 10.5 | Pérdida sección en el centro de la viga, carcoma, grietas, alabeo | Rechazo | Gema |
| 6 | 9.9 | Carcoma, alta humedad en cabeza de viga en muro, ahuecamiento, elevada pérdida de sección en la cabeza final de viga, apoyo insuficiente en inicio de viga (170 mm) | Rechazo | Nudo Gema |
| 15 | 10 | Carcoma | Rechazo | |

IV. CONCLUSIONES

La inspección no destructiva de estructuras de madera mediante métodos acústicos ha demostrado su aplicabilidad en distintos casos prácticos. Es posible detectar termitas en fase activa mediante la técnica de emisión acústica en el rango ultrasónico, de una forma rápida y no invasiva, permitiendo una detección temprana. Además, se ha comprobado la aplicación de la inspección por ondas elásticas para la obtención del módulo elástico en estructuras en funcionamiento, sin desmontar la estructura. Dichos resultados han resultado coherentes con el análisis estructural por modelado numérico y con la inspección visual, que requiere mucho más tiempo y un acceso a todas las caras de la viga.

Por tanto, se concluye que la inspección no destructiva de estructuras de madera mediante métodos acústicos es una alternativa eficaz para tomar decisiones inteligentes y basadas en la ciencia antes de realizar una intervención en una estructura.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación está financiada por la Secretaría General de Vivienda de la Consejería de Fomento, Infraestructuras y Ordenación del Territorio de la Junta de Andalucía (Proyecto ACUSMADERA, UGR.20-06) y por el Programa de Proyectos de Investigación Precompetitivos de Jóvenes Investigadores de la Universidad de Granada. El grupo de investigación IDIE ofrece el servicio de inspección de estructuras de madera mediante estas técnicas a través de la página web: <http://acusmadera.ugr.es/>

REFERENCIAS

- F. Arriaga, F. Peraza, M. Esteban, I. Bobadilla y F. García. Intervención en estructuras de madera. Rivas, España: AITIM, 2002.
- AENOR. UNE 41805-8:2009. Diagnóstico de edificios. Parte 8: Estudio patológico de la estructura del edificio. Estructuras de madera. Madrid: AENOR, 2009.
- AENOR. UNE 56418:2016. Protocolo de actuación en cascos urbanos afectados por ataques de termitas subterráneas. Madrid: AENOR, 2016.
- AENOR. UNE-EN 338:2016. Madera estructural. Clases resistentes. Madrid: AENOR, 2017.
- AENOR. UNE 56544:2011. Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas. Madrid: AENOR, 2011.
- AENOR. UNE-EN 384:2016+A1:2019. Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad. Madrid: AENOR, 2020.
- Bucur y R. R. Archer, "Elastic constants for wood by an ultrasonic method", *Wood Science and Technology*, vol. 18, pp. 255- 265, 1984.
- A. Gallego y E. Martínez. Emisión Acústica. Niveles I y II. Madrid: Confemetal, 2015.
- P. Palma y R. Steiger. "Structural health monitoring of timber structures – Review of available methods and case studies", *Construction and Building Materials*, 248 ID 118528, 2020.
- J. Rescalvo, M. A. Ripoll, E. Suarez y A. Gallego, "Effect of Location, Clone, and Measurement Season on the Propagation Velocity of Poplar Trees Using the Akaike Information Criterion for Arrival Time Determination", *Materials*, vol. 12(3), article ID: 356, 2019.
- W. P. Robbins, R. K. Mueller, T. Schaal y T. Ebeling, "Characteristics of acoustic emission signals generated by termite activity in wood", en *Proceedings of the IEEE 1991 Ultrasonics Symposium*, 1991, pp. 1047–1051.



Reconocimiento – NoComercial (by-nc): Se permite la generación de obras derivadas siempre que no se haga un uso comercial. Tampoco se puede utilizar la obra original con finalidades comerciales.