

2017

# MEND-ME

Desarrollo de una metodología para la evaluación no destructiva de madera estructural y aplicación innovadora a rehabilitación

Nº Expte: IMDEEA/2017/135

Programa: PROYECTOS DE I+D EN COOPERACIÓN CON EMPRESAS

Paquete de trabajo 1 – Estado del arte sobre la evaluación no destructiva de la madera estructural y los productos de madera usados en construcción

Entregable: E.1.2 - Fichas técnicas de las principales tecnologías de evaluación no destructiva

**Breve descripción.**

Fichas técnicas de las principales tecnologías de evaluación no destructiva

**Realizado por:**  
**AIDIMME**

Director y coordinador técnico del proyecto:  
Miguel Ángel Abián  
[mabian@aidimme.es](mailto:mabian@aidimme.es)



MEND-ME

Desarrollo de una metodología para la evaluación no destructiva de madera estructural y aplicación innovadora a rehabilitación

## Contenido

<b>RESUMEN EJECUTIVO .....</b>	<b>3</b>
<b>1. EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVA APLICADA A MADERA .....</b>	<b>4</b>
<b>2 FICHAS RESUMEN DE LAS PRINCIPALES TECNOLOGÍAS DE EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVA .....</b>	<b>6</b>

MEND-ME

Desarrollo de una metodología para la evaluación no destructiva de madera estructural y aplicación innovadora a rehabilitación

## RESUMEN EJECUTIVO

El presente documento corresponde a la tarea 1.3 (*Investigación sobre las tecnologías de evaluación no destructiva de posible uso en madera estructural*) del proyecto MEND-ME, financiado por el **IVACE** (Instituto Valenciano de Competitividad Empresarial) y cofinanciado por fondos del Programa Operativo **FEDER** de la Comunitat Valenciana 2014-2020.

Se ha recopilado información técnica respecto a las tecnologías de evaluación no destructiva (NDT) y su posible uso en madera estructural. Para ello se ha recurrido a artículos científicos y técnicos, libros, guías técnicas, manuales, normas europeas e internacionales, memorias de proyectos de investigación, tesinas y tesis doctorales. Asimismo, a partir de búsquedas en las bases de datos de patentes, se han recopilado patentes relacionadas con esas tecnologías. Se ha analizado el funcionamiento de todas esas tecnologías, así como los inconvenientes que presentan para proporcionar resultados fiables y útiles en la madera antigua, dadas las características especiales de ésta (mayor densidad, mayor proporción de duramen, defectos no visibles, etc.).

A partir de toda la información anterior se han preparado fichas resumidas adaptadas a las necesidades de empresas, profesionales (arquitectos, ingenieros, etc.) y Administraciones, con el fin de transferir y promover los resultados.

## 1. EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVA APLICADA A MADERA

En el caso de la madera, la tabla siguiente muestra las técnicas no destructivas de más interés.

Aunque se analizó numerosa documentación sobre la técnica RMN (resonancia magnética nuclear), se ha decidido finalmente excluirla, pues todavía no puede usarse *in situ* (no existen por el momento equipos portátiles que puedan emplearse en construcción) y falta más investigación sobre su aplicación a madera estructural en condiciones no de laboratorio.

Técnica no destructiva	Principio	Aplicación
Georradar	Propagación de radiación electromagnética en el elemento analizado y medida de la reflexión parcial en aquellas zonas con cambios en las propiedades dieléctricas. La radiación corresponde a las bandas de frecuencia situadas entre los 10 MHz y los 3 GHz (bandas de radiofrecuencias y de microondas).	Densidad Humedad Detección de huecos y cavidades ocultos
Microondas	Transmisión o reflexión de ondas electromagnéticas de microondas (300 MHz-30 GHz) en el elemento analizado, y determinación de parámetros como las constantes dieléctricas en las tres direcciones ( $\epsilon'$ ), la pérdida dieléctrica ( $\epsilon''$ ), la amplitud, la fase, y la polarización de la onda en el medio.	Densidad Humedad Detección de huecos y cavidades ocultos
Resistografía	Resistencia que opone la madera a la penetración mediante una aguja fina.	Densidad (indirectamente) Detección de defectos (huecos, fendas, bolsas de resina, etc.). Detección de nudos
Radiación de rayos X	Absorción de rayos X en cada zona del elemento analizado.	Densidad media y perfil de densidad Detección de huecos y cavidades ocultos Detección de nudos

MEND-ME

Desarrollo de una metodología para la evaluación no destructiva de madera estructural y aplicación innovadora a rehabilitación

Ultrasonidos	Propagación de una onda ultrasónica en el elemento analizado y medida del tiempo de vuelo de la onda.	Módulo de elasticidad y resistencia a flexión Detección indirecta de defectos (huecos, fendas, etc.) Detección indirecta de nudos
Vibraciones inducidas/ondas de presión	Propagación de una onda de presión o impacto en el elemento analizado y medida del tiempo de vuelo de la onda. Dependiendo del equipo utilizado, la muestra debe tener los dos extremos libres o a menos uno.	Módulo de elasticidad y resistencia a flexión Detección indirecta de defectos (huecos, fendas, etc.) Detección indirecta de nudos
Penetrometría	Introducción a presión de una varilla metálica en la madera con una energía prefijada.	Densidad. Detección indirecta de defectos (huecos, ataques de xilófagos, etc.).
Extracción de tornillos	Arranque de tornillos previamente clavados en la madera	Densidad. Detección indirecta de defectos (huecos, ataques de xilófagos, etc.).
Termografía	Conductividad térmica de la madera.	Detección de humedades Detección de defectos y degradaciones próximos a la superficie

*Tabla 1. Principales técnicas no destructivas aplicables a madera.*

MEND-ME

Desarrollo de una metodología para la evaluación no destructiva de madera estructural y aplicación innovadora a rehabilitación

## 2 FICHAS RESUMEN DE LAS PRINCIPALES TECNOLOGÍAS DE EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVA

### TÉCNICA 1: GEORRADAR

TÉCNICA:	GEORRADAR
<p><b>Definición</b></p>	<p>La técnica de georradar (GPR: Ground Penetrating Radar) consiste en emitir ondas electromagnéticas hacia el interior de la muestra de madera mediante una antena colocada en su superficie, siendo parcialmente reflejada en las interfaces donde existe un cambio de propiedades dieléctricas. En concreto, los georradares utilizan bandas de frecuencia situadas entre los 10 MHz y los 3 GHz; es decir, bandas de radiofrecuencias y de microondas. Los pulsos utilizados duran entre 0,5 y 100 nanosegundos.</p> <p>Actualmente se utiliza de forma regular en áreas muy diversas: geología, recursos naturales, hidrología, estudios medioambientales, arqueología, patrimonio histórico y artístico e ingeniería civil.</p>  <p><i>Equipo de georradar comercial. Fuente: <a href="http://www.orcromindustrial.com/">http://www.orcromindustrial.com/</a></i></p> <p>En la madera, el georradar detecta cavidades internas, y permite establecer su posición y tamaño.</p>
<p><b>Resultados que proporciona</b></p>	<p>Los resultados se muestran en un registro conocido como radargrama. En ocasiones es posible dar una interpretación directa de los radargramas. Sin embargo, a menudo, debe realizarse un largo proceso de interpretación para poder llegar a una conclusión final sobre la calidad de la madera.</p> <p>Este proceso requiere calcular parámetros del georradar como el rango, la posición del inicio, el número de pulsos emitidos por segundo durante la adquisición de datos, el factor de superposición de trazas, la función de ganancia y los filtros que se han aplicado al radargrama durante la adquisición o en posteriores tratamientos de las señales.</p>
<p><b>Ventajas</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiene una alta capacidad de penetración y proporciona buenos resultados de la estructura interna de la madera.</li> <li>• Detecta huecos y cavidades ocultos en el interior de la madera.</li> </ul>

MEND-ME

Desarrollo de una metodología para la evaluación no destructiva de madera estructural y aplicación innovadora a rehabilitación

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Muestra la distribución de humedades de un elemento.</li> <li>• No necesita un contacto directo con el elemento que se analiza, si bien un porcentaje mínimo de la huella de la antena (30-40%) debe quedar cubierta por la madera.</li> </ul>
<p><b>Desventajas y limitaciones</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se necesita personal especializado para la interpretación de los radargrama.</li> <li>• No existe un procedimiento para establecer una equivalencia entre los tamaños de las anomalías detectadas en los radargramas y la reducción de resistencia mecánica de la madera que conlleva la existencia de aquéllas.</li> <li>• A menudo, salvo en casos extremos, los resultados son difíciles de interpretar. No existen actualmente algoritmos para detectar automáticamente defectos en los radargramas ni tampoco para relacionarlos con la calidad estructural.</li> <li>• Se necesita más investigación para establecer una equivalencia entre los tamaños de las anomalías detectadas en los radargramas y la reducción de resistencia mecánica de la madera que conlleva su existencia.</li> <li>• No proporciona valores de resistencia mecánica ni sus resultados son susceptibles de convertirse directamente en esos valores. Los resultados pueden servir para rechazar elementos de madera nueva (en la industria) o para recomendar el refuerzo de elementos de madera antigua (en rehabilitación), pero no para clasificarlos según el sistema de clases resistentes del CTE.</li> <li>• Las maderas de menor densidad (por ejemplo, chopo o paulownia) tienen propiedades dieléctricas menores, lo que hace más difícil detectar defectos en los radargramas.</li> <li>• A lo largo de un elemento de madera, la antena del georradar debería desplazarse a velocidad constante para que los resultados sean comparables. Esto es muy difícil de conseguir, porque por el momento los georradares se utilizan manualmente.</li> <li>• Por el momento, no están definidas para madera la resolución del georradar para defectos (tamaño del nudo mínimo que puede detectarse, distancia entre nudos, distancia a la superficie de la pieza, desviación de la fibra).</li> <li>• No existes georradares específicos para madera o que estén configurados previamente para ésta.</li> <li>• No existe investigación sobre el uso de georradar en casos en los cuales los elementos de madera (cerchas, vigas, viguetas) están empotradas en otros materiales (ladrillos, hormigón, piedra), como sucede en los empotramientos en muros. Estas situaciones pueden analizarse con la técnica de resistografía.</li> <li>• No figura como técnica de evaluación y diagnóstico de la madera en la norma UNE 41805-8:2009 IN (Diagnóstico de edificios. Parte 8: Estudio patológico de la estructura del edificio. Estructuras de madera).</li> </ul>

MEND-ME

Desarrollo de una metodología para la evaluación no destructiva de madera estructural y aplicación innovadora a rehabilitación

**TÉCNICA 2: MICROONDAS**

<b>TÉCNICA:</b>	<b>MICROONDAS</b>
<p><b>Definición</b></p>	<p>Esta técnica permite formar imágenes de la estructura de un material basándose en la determinación de sus propiedades dieléctricas. Para interpretar correctamente las imágenes de microondas es necesario conocer la respuesta del material a los campos eléctricos y magnéticos, así como entender los mecanismos de interacción entre la muestra analizada y la sonda que se utiliza.</p> <p>En el caso concreto de la madera, esta técnica empezó a utilizarse industrialmente para mejorar los procesos de secado, en especial para madera de especies densas o nerviosas, y los de encolado (tableros, madera microlaminada, madera laminada encolada). Actualmente las aplicaciones industriales de la técnica se dirigen principalmente hacia la detección de defectos como nudos, fibra revirada, desviación de la fibra y discontinuidades estructurales en troncos, piezas aserradas y compuestos derivados de la madera. Para estos compuestos, los principales defectos que pueden detectarse son huecos, agujeros, ampollas, delaminaciones y otros defectos de adhesión. La escala de estos defectos está comprendida entre 0,1 y 0,001 metros.</p> <div data-bbox="523 1014 1297 1585" data-label="Image"> </div> <p><i>Ensayo de una vigueta de madera con un dispositivo experimental de microondas.        Fuente: Aichholzer et al. (2013)</i></p>
<p><b>Resultados que proporciona</b></p>	<p>La técnica permite obtener la densidad, el contenido en humedad y el ángulo de fibra de la madera. Asimismo, permite detectar defectos en la madera.</p>
<p><b>Ventajas</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiene una alta capacidad de penetración y proporciona buenos resultados de la estructura interna de la madera.</li> <li>• Detecta huecos y cavidades ocultos en el interior de la madera.</li> <li>• Determina con precisión la humedad de la madera.</li> <li>• No necesita un contacto directo con el elemento que se analiza.</li> <li>• Permite obtener medidas en tiempo real en línea.</li> </ul>

MEND-ME

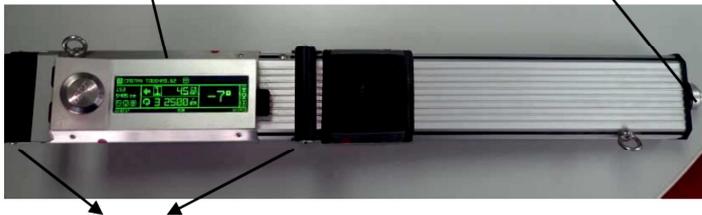
Desarrollo de una metodología para la evaluación no destructiva de madera estructural y aplicación innovadora a rehabilitación

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requiere baja potencia.</li> </ul>
<p><b>Desventajas y limitaciones</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No existen equipos comerciales de microondas específicos para inspección de madera en obra (<i>in situ</i>). Los equipos existentes son para líneas de aserraderos o laboratorios, o bien experimentales.</li> <li>• Hasta la fecha, los sistemas de microondas no se han extendido ampliamente en los aserraderos por la naturaleza física cambiante de las microondas y, por otro lado, por la falta de equipos y componentes electrónicos apropiados, robustos y de bajo coste.</li> <li>• No proporciona valores de resistencia mecánica ni sus resultados son susceptibles de convertirse directamente en esos valores. Los resultados pueden servir para rechazar elementos de madera nueva (en la industria) o para recomendar el refuerzo de elementos de madera antigua (en rehabilitación), pero no para clasificarlos según el sistema de clases resistentes del CTE.</li> <li>• En los aserraderos, debido a las velocidades altas de inspección en línea, las vibraciones mecánicas de los troncos o los tablones perturban la medida de la polarización de la onda de microondas, lo que ocasiona una pérdida significativa de resolución en cuanto a los defectos.</li> <li>• Aunque las potencias de trabajo son bajas, por seguridad no es conveniente radiar microondas sin protección.</li> <li>• Se requiere mucha más investigación y pruebas en el campo de la madera.</li> <li>• No existe investigación sobre el uso de microondas en casos en los cuales los elementos de madera (cerchas, vigas, viguetas) están empotradas en otros materiales (ladrillos, hormigón, piedra), como sucede en los empotramientos en muros. Estas situaciones pueden analizarse con la técnica de resistografía.</li> <li>• No figura como técnica de evaluación y diagnóstico de la madera en la norma UNE 41805-8:2009 IN (Diagnóstico de edificios. Parte 8: Estudio patológico de la estructura del edificio. Estructuras de madera).</li> </ul>

MEND-ME

Desarrollo de una metodología para la evaluación no destructiva de madera estructural y aplicación innovadora a rehabilitación

### TÉCNICA 3: RESISTOGRAFÍA

TÉCNICA:	RESISTOGRAFÍA
<p><b>Definición</b></p>	<p>Se basa en cuantificar, mediante un equipo denominado resistógrafo, la resistencia que ofrece la madera a la perforación mediante una broca extremadamente fina. El equipo va registrando durante el ensayo la resistencia que presenta el material a la penetración de la broca de 3 mm de diámetro en la punta y de 1,5 mm en el fuste a velocidad constante, mediante un potenciómetro conectado al motor eléctrico.</p> <p>Por medio del potenciómetro se mide el consumo de energía eléctrica del motor encargado de la rotación de la broca. La resistencia que la madera ofrece al avance de la broca está muy relacionada con la densidad de la madera; los resultados del equipo permiten diferenciar los anillos de crecimiento, pues se registran perfectamente las variaciones de densidad entre la madera de verano y de primavera. Como la resistografía detecta áreas de baja densidad en elementos de madera, puede detectar zonas con posible decaimiento o deterioro, así como zonas de la madera con baja densidad por motivos naturales de crecimiento del árbol del cual procede.</p> <p style="text-align: center;"><b>Resistógrafo IML-RESI PD400</b></p>  <p style="text-align: center;"><i>Instrumento de perforación. 1: asideros; 2: unidad digital de registro de datos; 3: aguja perforadora. Fuente: AIDIMME</i></p> <p>En los modelos más recientes de resistógrafos, el registro de datos se realiza gráficamente a través de una memoria y una pantalla digital que reproduce las resistografías o perfiles resistográficos. Una unidad digital registra todos los datos correspondientes a cada una de las perforaciones llevadas a cabo.</p> <p>Esta técnica se utiliza tanto en árboles en pie como en rollizos y en madera aserrada.</p>
<p><b>Resultados que proporciona</b></p>	<p>Los resultados obtenidos son datos numéricos que se expresan mediante gráficas de porcentaje de amplitud (resistografías o perfiles resistográficos).</p> <p>Durante el proceso de perforación se genera la gráfica o resistografía, la cual se visualiza mediante una pantalla digital en el modelo de resistógrafo IML-RESI PD400.</p>

MEND-ME

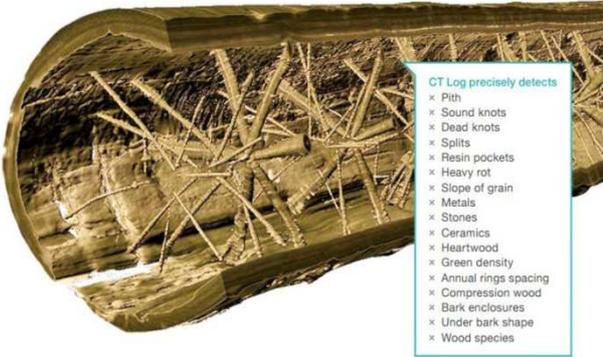
Desarrollo de una metodología para la evaluación no destructiva de madera estructural y aplicación innovadora a rehabilitación

	 <p><i>Gráfica generada durante el proceso de perforación. Fuente: AIDIMME</i></p> <p>Los valores medios de las resistografías se correlacionan con la densidad media de la madera. En el eje de abscisas se representa la longitud de la perforación y en el de las ordenadas la resistencia a la perforación en % ofrecida por la pieza. Así, en las resistografías, es posible detectar posibles pudriciones y defectos de la madera, tanto en la puesta en obra como en árboles vivos.</p>
<p><b>Ventajas</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permite el acceso a elementos que no son visibles y de difícil acceso como empotramientos de vigas o viguetas en muros y muretes.</li> <li>• Las perforaciones pueden hacerse diagonalmente sobre el plano de la sección, lo cual aporta más información sobre el estado del elemento perforado que una resistografía perpendicular o transversal.</li> <li>• Permite conocer el estado de la muestra a la vez que se realiza la inspección (en dispositivos con muestra de gráfica en pantalla digital).</li> <li>• Hace posible diferenciar claramente la madera que presenta un ataque por hongos de la afectada por un ataque de insectos.</li> <li>• La resistencia a la penetración disminuye significativamente hasta un nivel constante cuando el ataque ha sido realizado por hongos; mientras que la resistencia disminuye de forma muy localizada en un ataque por insectos.</li> <li>• Por la portabilidad del equipo, la técnica pueda aplicarse perfectamente en obra. Como los resultados se obtienen al mismo tiempo que se realiza el ensayo, pueden tomarse decisiones de sustitución, refuerzo o consolidación en la propia obra.</li> <li>• Existe mucha experiencia en la aplicación de la resistografía a la evaluación de madera en obra y existe documentación específica al respecto de cómo debe emplearse para evaluar madera en obra.</li> <li>• La norma UNE 41805-8:2009 IN (Diagnóstico de edificios. Parte 8: Estudio patológico de la estructura del edificio. Estructuras de madera) incluye la técnica de resistografía como una moderna técnica de clasificación por métodos no destructivos, aplicable en el ámbito del diagnóstico de madera puesta en obra.</li> </ul>
<p><b>Desventajas y limitaciones</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No proporciona directamente perfiles de densidad de la madera, si bien los perfiles resistográficos obtenidos son muy aproximadamente proporcionales a la densidad.</li> <li>• Algunas especies de madera tienen de forma natural, por su baja densidad, bajos valores de resistencia a la penetración, pero ello no constituye un síntoma de degradación.</li> <li>• Para preservar completamente el aspecto estético del elemento analizado, deben rellenarse los diminutos orificios efectuados por la perforación de la broca con selladores de silicona, adhesivos o masilla de serrín.</li> <li>• No proporciona valores de resistencia mecánica ni sus resultados son susceptibles de convertirse directamente en esos valores. Los resultados pueden servir para rechazar elementos de madera nueva (en la industria) o para recomendar el refuerzo de elementos de madera antigua (en rehabilitación), pero no para clasificarlos según el sistema de clases resistentes del CTE.</li> </ul>

MEND-ME

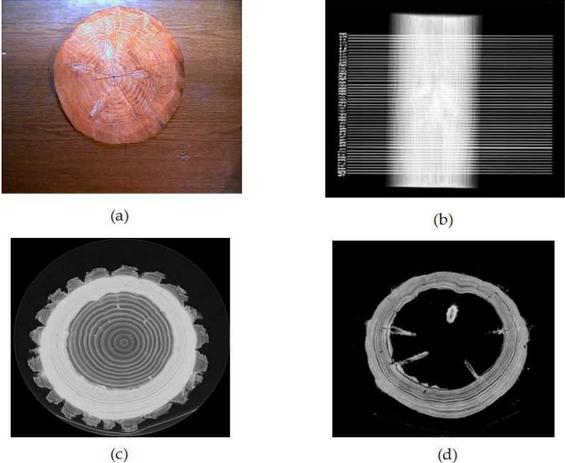
Desarrollo de una metodología para la evaluación no destructiva de madera estructural y aplicación innovadora a rehabilitación

**TÉCNICA 4: RAYOS X**

TÉCNICA:	RAYOS X
<p><b>Definición</b></p>	<p>Esta técnica usa rayos X para detectar variaciones de densidad en la madera (la atenuación de la radiación varía directamente con la densidad del medio). Por tanto, puede detectar defectos internos (huecos, grietas, degradaciones, bolsas de resina, etc.).</p>  <p><i>Reconstrucción 3D del interior de un tronco mediante CT Log. A partir de la imagen puede realizarse un aserrado óptimo, con el mínimo desperdicio de material.</i>  <i>Fuente: Microtec.</i></p>  <p><i>Sistema portátil digital de rayos X RTR-4. Fuente: LEIDOS.</i></p> <p>Los resultados suelen mostrarse como perfiles de coeficientes de atenuación de la radiación, perfiles de densidad (directamente relacionada con la atenuación) o como imágenes digitales 2D (tomogramas) o 3D generados mediante software especiales.</p>

MEND-ME

Desarrollo de una metodología para la evaluación no destructiva de madera estructural y aplicación innovadora a rehabilitación

<p><b>Resultados que proporciona</b></p>	<p>En el caso de las imágenes digitales, suele usarse la escala de unidades de Hounsfield (HU en inglés) que se obtiene de transformar la escala de coeficientes de atenuación lineal de los rayos X en una nueva escala en la que el valor de atenuación del agua pura destilada en condiciones normales de presión y temperatura (1 atm y 0°C) se define como 0 unidades de Hounsfield o HU y la radiodensidad del aire en esas mismas condiciones como -1.000. En el análisis por imagen, los valores útiles de la escala Hounsfield van de -1.024 HU hasta 3.071 HU, que se representan como 4.096 niveles de gris.</p> <div style="text-align: center;">  <p>(a) (b) (c) (d)</p> </div> <p><i>Proceso de análisis por rayos X de una sección de un tronco (tomografía). Puede apreciarse en (d) la presencia de varios nudos y las zonas de albura (gris claro) y duramen (negra). Fuente: Aguilera et al. (2012).</i></p>
<p><b>Ventajas</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es muy efectiva para determinar la densidad y la existencia de defectos internos con gran precisión.</li> <li>• Con los equipos portátiles digitales de rayos X, es posible su uso para evaluar estructuras <i>in situ</i>.</li> <li>• No es necesario el contacto con el elemento que se desea analizar.</li> </ul>
<p><b>Desventajas y limitaciones</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La técnica no es compatible con ambientes sucios, como suelen ser las obras en rehabilitación, y precisa personal cualificado.</li> <li>• Se necesita calibración previa para determinar la densidad de la madera.</li> <li>• Los equipos portátiles de rayos X son caros todavía.</li> <li>• Los equipos portátiles de alta resolución generan por ahora imágenes de zonas pequeñas (30 x 40 cm), por lo que no resultan prácticos para analizar grandes estructuras.</li> <li>• Es necesaria la protección radiológica del personal que la usa.</li> <li>• La zona de seguridad es muy grande: 3 metros alrededor del emisor de rayos X, 30 metros en la dirección de medida y 11 metros en perpendicular.</li> <li>• No proporciona valores de resistencia mecánica ni sus resultados son susceptibles de convertirse directamente en esos valores. Los resultados pueden servir para rechazar elementos de madera nueva (en la industria) o para recomendar el refuerzo de elementos de madera antigua (en rehabilitación), pero no para clasificarlos según el sistema de clases resistentes del CTE.</li> <li>• No figura como técnica de evaluación y diagnóstico de la madera en la norma UNE 41805-8:2009 IN (Diagnóstico de edificios. Parte 8: Estudio patológico de la estructura del edificio. Estructuras de madera).</li> </ul>

MEND-ME

Desarrollo de una metodología para la evaluación no destructiva de madera estructural y aplicación innovadora a rehabilitación

**TÉCNICA 5: ULTRASONIDOS**

<b>TÉCNICA:</b>	<b>ULTRASONIDOS</b>
<p><b>Definición</b></p>	<p>La técnica de ultrasonidos permite determinar el módulo de elasticidad dinámico a partir de la densidad de la madera y la velocidad de propagación de ondas ultrasónicas. Una vez conocido el módulo de elasticidad dinámico (MOE dinámico), puede determinarse su resistencia a flexión o módulo de rotura dinámico (MOR dinámico). Como el MOE y el MOR dinámicos obtenidos así están fuertemente correlacionados con el MOE y el MOR estáticos (es decir, obtenidos mediante ensayos destructivos de flexión) y son buenos predictores de éstos, puede asignarse mediante esta técnica una clase resistente al elemento analizado, según el Código Técnico de la Edificación. Cualquier defecto de la madera (como pudrición por hongos, ataques de insectos, grietas, etc.) influye directamente en la velocidad de propagación de la onda ultrasónica y en su atenuación, por lo que también afecta al MOE y MOR.</p> <p>Las ondas ultrasónicas tienen una frecuencia mínima de 20 KHz y llegan hasta rangos de MHz. La resolución de las pruebas de ultrasonidos varía en función de la frecuencia aplicada a la muestra: se detectan los defectos más pequeños en la madera a frecuencias más altas.</p>  <p><i>Equipo de ultrasonidos FAKOPP UltraSonic-Timer. Fuente: FAKOPP.</i></p>
<p><b>Resultados que proporciona</b></p>	<p>Se obtiene la velocidad de onda ultrasónica en la madera, y conociendo la densidad de ésta puede deducirse el módulo de elasticidad de la madera y su resistencia a flexión (dinámicos).</p> <p>Algunos equipos proporcionan solamente la velocidad de la onda (por ejemplo, FAKOPP Microsecond Timer) y otros calculan también el MOE y MOR y la clase resistente de la madera (Sylvatest) introduciendo la especie y humedad de la madera.</p>

MEND-ME

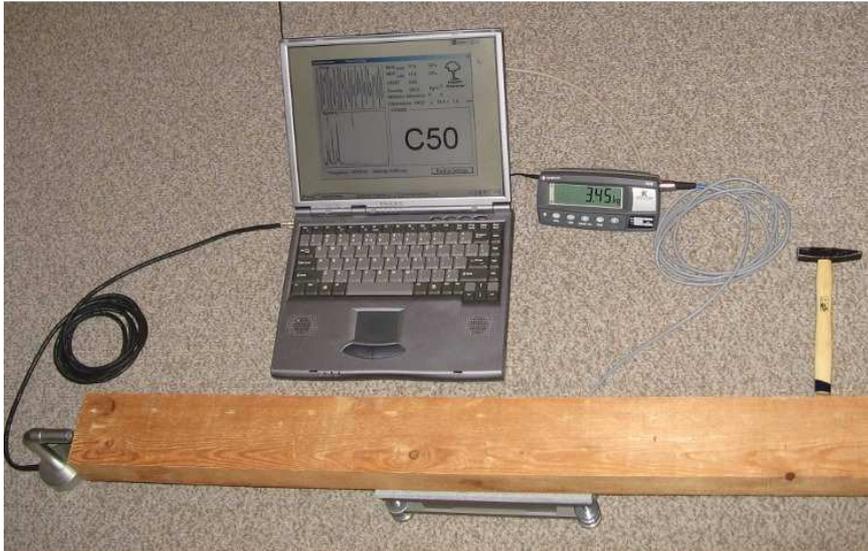
Desarrollo de una metodología para la evaluación no destructiva de madera estructural y aplicación innovadora a rehabilitación

<p><b>Ventajas</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permite determinar el módulo de elasticidad, la resistencia a flexión y, por tanto, la clase resistente de la madera según el CTE.</li> <li>• El tiempo de toma de la medida es breve.</li> <li>• Los equipos comerciales son robustos, lo que permite su uso en obra.</li> <li>• Está firmemente asentado en la industria.</li> <li>• La norma UNE 41805-8:2009 IN (Diagnóstico de edificios. Parte 8: Estudio patológico de la estructura del edificio. Estructuras de madera) incluye la técnica de ultrasonidos como una moderna técnica de clasificación por métodos no destructivos, aplicable en el ámbito del diagnóstico de madera puesta en obra.</li> </ul>
<p><b>Desventajas y limitaciones</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La técnica de transmisión ultrasónica exige asegurar un acoplamiento óptimo entre los transductores y el material. En el caso de la madera se recomienda usar brocas cónicas para realizar los orificios donde se colocan los extremos de los transductores, pues se mejora significativamente la repetitividad de los resultados.</li> <li>• Como se realizan perforaciones para colocar los transductores en el elemento de madera que vaya a evaluarse, después, si se quiere preservar el aspecto estético del elemento, deben taparse los orificios realizados con productos como selladores de silicona, adhesivos o masilla de serrín.</li> <li>• En entornos donde hay muchas vibraciones (por excavaciones, equipos electrógenos, perforadoras, etc.), los resultados son incorrectos o el equipo no responde apropiadamente.</li> <li>• Los resultados de equipos de transmisión ultrasónica de distintos fabricantes en cuanto a velocidades de onda son muy distintos. Las velocidades obtenidas con distintos equipos no son comparables entre sí, aunque se examinen elementos de la misma especie y la misma calidad estructural.</li> <li>• La falta de normalización de los equipos de medida obliga a efectuar mediciones de contraste para comprobar la influencia que puede tener en la medida la distancia de separación entre los transductores. Dependiendo del umbral de detección, propio del diseño del equipo, habrá un aparente retraso en la lectura de recepción de la onda, que si es grande, como en el caso del equipo Sylvatest, supondrá obtener, para idénticas calidades, menores valores de la velocidad al aumentar la longitud de las piezas.</li> </ul>

MEND-ME

Desarrollo de una metodología para la evaluación no destructiva de madera estructural y aplicación innovadora a rehabilitación

## **TÉCNICA 6: VIBRACIONES INDUCIDAS/ONDAS DE PRESIÓN**

<b>TÉCNICA:</b>	<b>VIBRACIONES INDUCIDAS/ONDAS DE PRESIÓN</b>
<b>Definición</b>	<p>Esta técnica se basa en inducir ondas de presión o impacto que recorran el elemento a inspeccionar. Al igual que en la técnica de ultrasonidos, se calcula el tiempo que tarda la onda de presión en recorrer cierta distancia, se determina la velocidad de propagación de la onda y, a partir de ésta y de la densidad del medio, se deduce el módulo de elasticidad dinámico (MOE dinámico) y el módulo de rotura o de resistencia a flexión dinámico (MOR dinámico).</p> <p>Como el MOE y el MOR dinámicos obtenidos así están fuertemente correlacionados con el MOE y el MOR estáticos (es decir, obtenidos mediante ensayos destructivos de flexión) y son buenos predictores de éstos, puede asignarse mediante esta técnica una clase resistente al elemento analizado, según el Código Técnico de la Edificación. Si la onda se encuentra con algún tipo de defecto en el elemento analizado su tiempo de recorrido aumentará respecto al tiempo de recorrido en un elemento sin defectos.</p> <p>La onda de presión se provoca mediante un impacto producido por un martillo o mediante las vibraciones inducidas generadas por un dispositivo vibratorio.</p>  <p><i>Equipo de vibraciones inducidas FAKKOP Portable Lumber Grader. Fuente: FAKOPP.</i></p> <p>El uso de esta técnica también se ha utilizado para la detección de pudriciones y defectos internos en árboles en pie; pero no es posible describir la geometría del defecto de la pieza. Se obtiene una mejor evaluación de árboles en pie combinando las técnicas de vibraciones inducidas y resistografía con la inspección visual.</p> <p>En el mercado existen varias máquinas basadas en esta técnica para su uso en líneas de aserraderos y de fábricas de madera laminada encolada. Dos de ellas son Dynagrade y Precigrader. En estas máquinas, la vibración producida por un pequeño impacto en el extremo del elemento de madera es grabada por micrófonos. Al mismo tiempo, la longitud se mide mediante un láser.</p>

MEND-ME

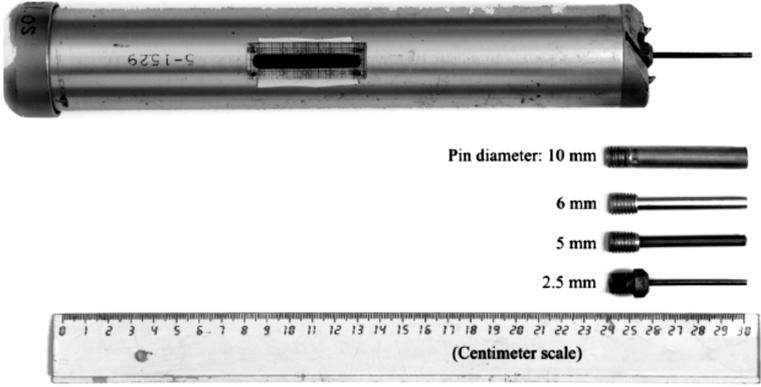
Desarrollo de una metodología para la evaluación no destructiva de madera estructural y aplicación innovadora a rehabilitación

<p><b>Resultados que proporciona</b></p>	<p>Se obtiene la velocidad de la onda de presión en la madera, y conociendo la densidad de ésta puede deducirse el módulo de elasticidad de la madera y su resistencia a flexión (dinámicos). También puede obtenerse la frecuencia de resonancia y, conociendo la masa del elemento y sus dimensiones, puede deducirse el módulo de elasticidad de la madera y, a partir de ella, su resistencia a flexión y el módulo de cizalla (dinámicos).</p> <p>Algunos equipos proporcionan solamente la velocidad de la onda. Otros calculan a partir de la frecuencia de resonancia el MOE y MOR y la clase resistente de la madera, siempre que se calcule y se introduzca antes la densidad de ésta en el equipo. Para estos últimos, puede no calcularse la densidad y seleccionar una especie en la pantalla de estos dos equipos, pero entonces la densidad que el equipo usa para el cálculo será aproximada, no la real, y los resultados obtenidos serán más imprecisos.</p>
<p><b>Ventajas</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permite determinar el módulo de elasticidad, la resistencia a flexión y, por tanto, la clase resistente de la madera según el CTE.</li> <li>• El tiempo de toma de la medida es muy breve.</li> <li>• La norma UNE 41805-8:2009 IN (Diagnóstico de edificios. Parte 8: Estudio patológico de la estructura del edificio. Estructuras de madera) incluye la técnica de vibraciones inducidas como una moderna técnica de clasificación por métodos no destructivos, aplicable en el ámbito del diagnóstico de madera puesta en obra.</li> </ul>
<p><b>Desventajas y limitaciones</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• En general, la técnica no es muy precisa para las especies de madera menos homogéneas que presentan gran número de defectos individuales (nudos, por ejemplo). Por tanto, tampoco resulta precisa para madera antigua, que a menudo tienen muchos defectos individuales, causados por termitas, carcoma y hongos de pudrición.</li> <li>• En el caso de algunos equipos, se realizan perforaciones para colocar los acelerómetros en el elemento de madera que vaya a evaluarse. Después, si se quiere preservar el aspecto estético del elemento, deben taparse los orificios con selladores de silicona, adhesivos o masilla de serrín.</li> <li>• En el caso de algunos equipos, el ensayo debe realizarse en elementos de madera con los extremos libres (es decir, con elementos no sujetos a estructuras), por lo cual este equipo es inapropiado para usarse en elementos ya instalados en obras. Por otra parte, estos equipos requieren introducir la densidad de la muestra, que en algunos casos es difícil de determinar (p.ej., por geometría irregular o variable) y para lo que se precisa una báscula. Puede no calcularse la densidad y seleccionar una especie en la pantalla de los equipos, pero entonces la densidad que estos dos equipos usan para el cálculo será aproximada, no la real, y los resultados obtenidos serán más imprecisos.</li> <li>• Al igual que sucede con los equipos de ultrasonidos, los resultados de equipos de vibraciones inducidas de distintos fabricantes en cuanto a velocidades de onda son muy distintos. Las velocidades obtenidas con distintos equipos no son comparables entre sí, aunque se examinen elementos de la misma especie y la misma calidad estructural.</li> <li>• En entornos donde hay muchas vibraciones (por excavaciones, equipos electrógenos, perforadoras, etc.), los resultados son incorrectos o el equipo no responde apropiadamente.</li> </ul>

MEND-ME

Desarrollo de una metodología para la evaluación no destructiva de madera estructural y aplicación innovadora a rehabilitación

**TÉCNICA 7: PENETROMETRÍA**

<b>TÉCNICA:</b>	<b>PENETROMETRÍA</b>
<p><b>Definición</b></p>	<p>Se basa en la medición de la densidad y dureza de la madera mediante un instrumento portátil conocido como penetrómetro (el más conocido llama PILODYN). El instrumento es un cilindro metálico, en cuyo interior se aloja un muelle que se comprime manualmente hasta que acumula una energía potencial determinada (6 Julios en el modelo PILODYN J6).</p> <p>Cuando el muelle se libera, impulsa una varilla metálica contra la madera. Dependiendo de la de la profundidad alcanzada por la varilla, pueden predecirse valores de densidad y dureza. La punta de la varilla se cambia cada 5000 golpes aproximadamente.</p>  <p><i>Penetrómetro PILODYN J6 con la varilla estándar de 2,5 mm de diámetro conectada. El cuerpo del instrumento tiene 270 mm de longitud (con varilla en extensión, 320 mm) y 50 mm de diámetro. La escala de medición se muestra en el medio del dispositivo. Todos los pines se conectan con una rosca M10 al instrumento. Fuente: Mäkipää et. al. (2011) y Palaia (2014).</i></p> <p>Además de para detectar deterioros en la madera y para caracterizar la madera aserrada destinada a fines estructurales y sus materiales derivados, este instrumento se emplea para medir el crecimiento de los anillos anuales del núcleo radial en árboles vivos. Para este caso, permite comparar el desarrollo de la densidad de la madera en función del clima, altitud, topografía y naturaleza del suelo.</p> <p>El modelo 6J (Energía de impacto: 6 Julios) se usa comúnmente para la detección de deterioros en madera estructural y en postes.</p>
<p><b>Resultados que proporciona</b></p>	<p>Da valores de profundidad de penetración (mm). Los valores normales para madera en buen estado van de 9 y 12 mm, pudiendo llegar a 13 mm, dependiendo de la especie en concreto. Valores superiores a 13 mm pueden indicar degradación de la madera.</p> <p>Los resultados son locales. Es decir, corresponden al área dónde se aplica el instrumento, y no a todo el elemento.</p>

MEND-ME

Desarrollo de una metodología para la evaluación no destructiva de madera estructural y aplicación innovadora a rehabilitación

<p><b>Ventajas</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se puede determinar la densidad de la madera de forma rápida y no destructiva</li> <li>• Es un instrumento ligero, fácilmente transportable, y de fácil uso, pudiendo evaluar los árboles en pie o en servicio.</li> <li>• La norma UNE 41805-8:2009 IN (Diagnóstico de edificios. Parte 8: Estudio patológico de la estructura del edificio. Estructuras de madera) recoge la técnica de penetrometría (Pilodyn) como una moderna técnica de clasificación por métodos no destructivos, aplicable en el ámbito del diagnóstico de madera puesta en obra.</li> <li>• Es más cómodo de usar que los equipos de ultrasonidos y de resistografía.</li> </ul>
<p><b>Desventajas y limitaciones</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La correlación de los resultados obtenidos con la densidad de la madera no es por el momento concluyente para cualquier especie de madera. En algunos casos la correlación es claramente no significativa.</li> <li>• Su uso se limita a valorar el estado superficial de la pieza, hasta 40 mm de profundidad.</li> <li>• Es necesario determinar el contenido de humedad a la hora de realizar los ensayos, por medio de un xilohigrómetro, debido a la influencia del contenido de humedad en las características mecánicas de la madera (Smith y Morrell, 1986).</li> <li>• Muchos autores recomiendan usarlo en combinación con otras técnicas no destructivas como resistografías o ultrasonidos, a fin de contrastar y mejorar resultados.</li> <li>• Es conveniente tener en cuenta la dirección en la que se está introduciendo la varilla, puesto que pueden variar los resultados.</li> <li>• No proporciona valores de resistencia mecánica ni sus resultados son susceptibles de convertirse directamente en esos valores. Los resultados pueden servir para rechazar elementos de madera nueva (en la industria) o para recomendar el refuerzo de elementos de madera antigua (en rehabilitación), pero no para clasificarlos según el sistema de clases resistentes del CTE.</li> </ul>

MEND-ME

Desarrollo de una metodología para la evaluación no destructiva de madera estructural y aplicación innovadora a rehabilitación

## TÉCNICA 8: EXTRACCIÓN DE TORNILLOS

<b>TÉCNICA:</b>	<b>EXTRACCIÓN DE TORNILLOS</b>
<p><b>Definición</b></p>	<p>Se introduce un tornillo en la pieza de madera de interés y mediante un dispositivo se registra la máxima fuerza que se necesita para sacar el tornillo de la pieza. Mediante esta técnica se logra relacionar la fuerza de arranque con la densidad de la madera, y además pueden detectarse daños y degradaciones ocultas en las piezas de madera.</p>  <p><i>El aparato para esta técnica consta de un dispositivo de sujeción del tornillo, un transductor que registra la fuerza máxima de arranque, y un husillo, para la extracción del tornillo. Fuente: SANITE.</i></p> <p>En cuanto a la aplicación de esta técnica, una vez sujeta firmemente con unas sargentas la muestra a analizar, para evitar cualquier vibración y movimiento, se introducen los tornillos sin pretaladro hasta la profundidad deseada y se coloca el extractor siguiendo las instrucciones del fabricante.</p> <p>La velocidad de giro del husillo en el sentido de las agujas del reloj se fija a un ritmo de media vuelta en 3 o 4 segundos. Cuando el dispositivo de sujeción entra en contacto con la cabeza del tornillo comienza a registrar la fuerza aplicada, y el dato resultante del ensayo es la fuerza máxima registrada en el momento de la rotura de las fibras y arranque del tornillo.</p>
<p><b>Resultados que proporciona</b></p>	<p>Proporciona la fuerza (en Newtons) de extracción del tornillo de la madera. Después, se emplea la fuerza de extracción para predecir la densidad de la madera. Por ejemplo, algunos investigadores proponen la siguiente relación:</p> $Densidad (g/cm^3) = \frac{1}{0,93 + \frac{2,47}{Fuerza\ canto\ (kN)}}$
<p><b>Ventajas</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es una técnica de fácil implantación en obra y rápido uso.</li> <li>• El equipamiento es ligero.</li> </ul>

MEND-ME

Desarrollo de una metodología para la evaluación no destructiva de madera estructural y aplicación innovadora a rehabilitación

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permite predecir la existencia de daños bióticos en la madera puesta en obra, pues detecta diferencias en la resistencia a la extracción dependiendo del estado de la madera. Esto resulta interesante, sobre todo en aquellos casos en los que la madera no presenta externamente indicios de degradación.</li> <li>• Permite predecir la densidad de la madera y no influyen en los resultados el contenido de humedad de la madera, al menos para el rango de humedad 8,5-12,5%.</li> <li>• Determinada la densidad de la madera mediante esta técnica, el valor obtenido puede emplearse como predictor de otras características o como primer paso para el cálculo del módulo de elasticidad dinámico y la resistencia a flexión dinámica mediante técnicas como ultrasonidos o vibraciones inducidas/ondas de presión.</li> </ul>
<p><b>Desventajas y limitaciones</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No figura en las técnicas de evaluación de los procesos patológicos mediante procesos no destructivos de la norma UNE 41805-8:2009 IN (Diagnóstico de edificios. Parte 8: Estudio patológico de la estructura del edificio. Estructuras de madera).</li> <li>• Se usa poco en España.</li> <li>• El empleo de tornillos no recomendados por el fabricante, de mayores diámetros, conlleva aplicar mayor fuerza de extracción y, por tanto, dificultades de aplicación en obra. Además, en ciertos casos (madera de mobiliario o, en general, madera antigua con gran contenido en duramen), puede alcanzarse la fuerza límite del servicio del extractor.</li> <li>• Por sí sola, no permite predecir fiablemente ni el módulo de elasticidad ni la resistencia a flexión. Por tanto, no permite clasificar la madera según el CTE. Incluso complementándolo con la técnica de ultrasonidos y tomando como otro parámetro la velocidad de propagación de la onda no predice bien ni el MOE ni el MOR.</li> </ul>

MEND-ME

Desarrollo de una metodología para la evaluación no destructiva de madera estructural y aplicación innovadora a rehabilitación

**TÉCNICA 9: TERMOGRAFÍA DE INFRARROJOS**

<b>TÉCNICA:</b>	<b>TERMOGRAFÍA DE INFRARROJOS</b>
<p><b>Definición</b></p>	<p>La termografía es una técnica de inspección no destructiva que sin necesidad de establecer un contacto directo permite obtener resultados sobre grandes áreas y con una sola medición. Se basa en los principios físicos de transmisión de calor y permite obtener a partir de la energía emitida por un objeto, en el rango de infrarrojos, la temperatura superficial del mismo.</p> <p>Con la inspección inicial termográfica de una estructura de madera se detectan los focos de humedad y, por tanto, las zonas donde más probable es que haya problemas de pudrición y pérdidas de densidad.</p> <p>Mediante unos dispositivos ópticos, esta radiación es recogida por una cámara termográfica y transformada en señales eléctricas. Así se obtienen los llamados termogramas: mapas térmicos en los cuales cada tono de color representa la temperatura de la superficie en ese punto. Según un rango de valores se establecen las diferencias de temperaturas del objeto.</p> <div data-bbox="753 958 1066 1397" data-label="Image"> </div> <p data-bbox="603 1429 1219 1458"><i>Cámara de Infrarrojos E6 con MSX. Fuente: FLIR Systems.</i></p> <div data-bbox="486 1480 1342 1753" data-label="Image"> </div> <p data-bbox="497 1785 1326 1845"><i>Imagen termográfica de un techo de madera con filtración de agua. Fuente: TRATECVL.</i></p>
<p><b>Resultados que proporciona</b></p>	<p>Proporciona termogramas.</p> <p>En el caso de la madera, los termogramas permiten diferenciar, cuando es posible, distintas especies de madera en la medida que cada una de ellas tenga un valor de densidad distinto a los de las demás. También permite detectar defectos y</p>

MEND-ME

Desarrollo de una metodología para la evaluación no destructiva de madera estructural y aplicación innovadora a rehabilitación

	<p>degradaciones no superficiales, dependiendo de su tamaño y profundidad. En este sentido, en las variaciones de contenido de humedad, puede detectarse el tamaño y profundidad de los defectos detectables con esta técnica.</p>
<p><b>Ventajas</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permite inspeccionar en una sola medición superficies amplias incluso en zonas de difícil accesibilidad.</li> <li>• Los termogramas se obtienen muy rápidamente.</li> <li>• En la madera, permite detectar <i>in situ</i> diferentes contenidos de humedad, refuerzos y distintos materiales, así como zonas con pérdidas de densidad y deterioro.</li> </ul>
<p><b>Desventajas y limitaciones</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se usa poco debido al elevado precio de los equipos de termografía infrarroja.</li> <li>• La presencia de defectos en la madera influye en la conductividad del calor generando zonas de concentración o disipación de calor. Por otra parte, este tipo de discontinuidades también puede interpretarse como una diferencia de emisividad, ya que dicho parámetro depende del ángulo de incidencia. Por tanto, debe tenerse en cuenta la relevancia del tamaño del defecto y su relación con la distancia hasta la cámara y las características de ésta (sobre todo, la resolución). En ese sentido, el defecto puede resultar imperceptible a mayores distancias.</li> <li>• No existe mucha experiencia documentada para usos <i>in situ</i>.</li> <li>• La técnica es de fácil aplicación, pero se necesita personal experimentado para interpretar los termogramas.</li> <li>• Se recomienda hacer las inspecciones termográficas en días sin viento, pues el viento atenúa las temperaturas superficiales de los cuerpos y las diferencias térmicas que pueda existir entre las distintas zonas por el efecto de la convección, y por lo tanto puede enmascarar los resultados reales.</li> <li>• No figura en las técnicas de evaluación de los procesos patológicos mediante procesos no destructivos de la norma UNE 41805-8:2009 IN (Diagnóstico de edificios. Parte 8: Estudio patológico de la estructura del edificio. Estructuras de madera).</li> <li>• No proporciona, directa o indirectamente, el módulo de elasticidad ni la resistencia a flexión. Por tanto, no permite clasificar la madera según el CTE.</li> </ul>