

Proyecto MEND-ME: Evaluación no destructiva para clasificar madera estructural y rehabilitarla

Coordinador del proyecto y contacto: Miguel Ángel Abián
mabian@aidimme.es

Newsletter # 3-2017/18

Difusión de proyectos

En este proyecto de I+D, cuya primera anualidad acaba de concluir, se investiga la evaluación no destructiva de madera estructural nueva y antigua, así como nuevas soluciones y productos de refuerzo y consolidación para rehabilitar sistemas constructivos.

Recientemente ha concluido la primera anualidad del proyecto de I+D **MEND-ME** (Desarrollo de una metodología para la evaluación no destructiva de madera estructural y aplicación innovadora a rehabilitación), que está desarrollando **AIDIMME** (Instituto Tecnológico Metalmecánico, Mueble, Madera, Embalaje y Afines). El **IVACE** (Instituto Valenciano de Competitividad Empresarial) ha financiado esta anualidad del proyecto. El proyecto ha sido cofinanciado también por el Programa Operativo **FEDER** de la Comunidad Valenciana 2014-2020. MEND-ME consta de tres anualidades, y la primera ha transcurrido de enero de 2017 a junio de 2018.

El proyecto tiene como objetivo desarrollar **una metodología de análisis no destructivos que permita conocer el estado y calidad estructural de la madera actual o antigua**, para poder realizar rehabilitaciones de estructuras de madera en menor tiempo, de forma competitiva, sostenible, segura y fiable, así como aprovechar madera procedente de demoliciones bien para ejecutar esas rehabilitaciones o bien para usarla en nuevas estructuras.

MEND-ME nace de la **necesidad del sector de la construcción y de muchos arquitectos** de disponer de una caracterización mecánica y de una clasificación según el Código Técnico de la Edificación (CTE) de la madera existente en las edificaciones antiguas. Al mismo tiempo, nace de la necesidad, común a muchos arquitectos, ingenieros y empresas de rehabilitación, de disponer de soluciones y productos de refuerzo y consolidación para madera que puedan usarse en obra de manera rápida y económica.

Según Miguel Ángel Abián, jefe del Departamento de Tecnología y Biotecnología de la Madera, coordinador y director técnico del proyecto y responsable de la línea de I+D Madera en Construcción, “resulta necesario determinar fiablemente las propiedades físico-mecánicas de la madera antigua para que los arquitectos e ingenieros confíen en este material renovable y lo traten como un material normalizado. El CTE pone en pie de igualdad como materiales de construcción a la madera, el acero y el hormigón, siempre que se sigan sus procedimientos de cálculo”.

A continuación se exponen los principales resultados obtenidos en la primera anualidad.

1. Investigación sobre las especies de madera nueva y antigua y sobre su uso y conservación en rehabilitación y construcción

Los resultados de esta investigación determinan que la madera en construcción empleada en España ha estado representada mayoritariamente por especies de madera pertenecientes al grupo de las coníferas, salvo en el norte, donde se utilizaban algunas frondosas.

Los datos obtenidos mediante consultas de la bibliografía y mediante el análisis por AIDIMME de estructuras de madera en procesos de rehabilitación e intervención muestran que las especies de coníferas empleadas han sido *Pinus halepensis* (pino de Alepo o pino carrasco), *Pinus taeda* (pino amarillo del Sur, pino melis o pino mobila), *Pinus nigra* (pino negro), *Pinus sylvestris* (pino silvestre), *Pinus pinaster* (pino rodeno, pino marítimo, pino rubial o pino negral) y *Pinus radiata* (pino insigne, pino de Monterrey o pino de California) y *Picea abies* (abeto rojo). La única frondosa utilizada en la zona de levante ha sido *Populus nigra* (chopo negro).

Las especies de madera que se encuentran actualmente en desuso en actividades de rehabilitación son principalmente *Pinus halepensis*, *Pinus taeda* y *Populus nigra*. El resto de las enumeradas anteriormente siguen empleándose en procesos constructivos.

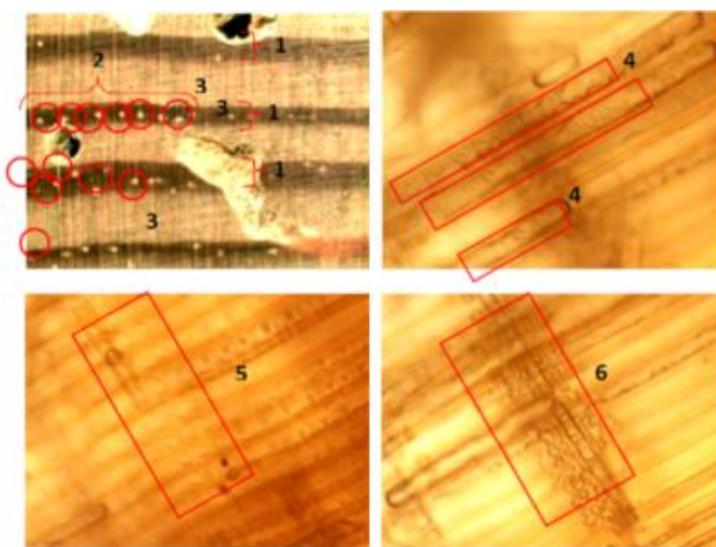


Imagen 1. Fotografías tomadas de los planos transversal, radial y tangencial de una muestra de pino silvestre.

La madera conocida como mobila (o mobila vieja), muy presente en muchos edificios de la Comunidad Valenciana, entró por el puerto de Valencia a finales del siglo XIX y principios del XX. Al analizar madera procedente de demoliciones y de estructuras de algunos edificios antiguos, AIDIMME encontró marcas en las cuales había referencias a los puertos de origen de la madera, los aserraderos y las compañías de exportación.



Imagen 2. Viga de la cubierta de una vivienda en Valencia con la inscripción "DENDINGUER TAMPA".

La mobila corresponde principalmente a la especie *Pinus tadea* L., si bien también puede corresponder a las especies *Pinus elliottii* Engelm, *Pinus echinata* Mill y *Pinus palustris* Mill, que comparten características similares. Es una madera procedente de árboles de crecimiento lento, con mucho duramen, casi sin albura, y en consecuencia con una gran cantidad de resina. Por ello es extraordinariamente densa (en algunos casos su densidad supera los 1000 kg/m³, y no suele bajar de 850 kg/m³), muy resistente a xilófagos (termita, carcoma y hongos) y presenta en ocasiones una resistencia mecánica superior a la correspondiente a la clase resistente C45 del Código Técnico de la Edificación. Esta resistencia tan elevada es más propia de algunas frondosas que de las coníferas. El pino silvestre actual, por ejemplo, tiene densidades comprendidas entre 500 y 540 kg/m³.

El duramen es leño biológicamente inactivo, con funciones de sostén para el árbol, que ocupa la porción del tronco entre la médula (corazón o parte más central) y la albura (parte joven de la madera). La duraminización o formación del duramen, que para el caso del haya (*Fagus sylvatica*) fue estudiada por AIDIMME en el proyecto europeo INNOBEECH, es un proceso con cambios microscópicos y a veces también macroscópicos (color) en la madera.



Imagen 3. Viga de 300 años de antigüedad procedente de un palacio perteneciente al patrimonio histórico valenciano. La madera de duramen se distingue por su color más oscuro (marrón).

Microscópicamente, la formación del duramen está muy asociada con la muerte (pérdida del protoplasma y del núcleo) de las células del parénquima. Esto es precedido normalmente por un cambio de la actividad fisiológica en dichas células. La formación del duramen se asocia también con la obstrucción de los vasos por sustancias minerales como sílice y carbonatos, extractos (sustancias gomosas, resinas) y tilosis (formación generalizada de tílides, estructuras que habitualmente obstruyen la cavidad de los elementos conductores del xilema). Por ese motivo la madera de duramen es poco o nada impregnable, incluso en tratamientos con autoclave y a presión: sus vasos están obstruidos.

La deposición de extractos en las células es la responsable de los cambios de color. Estos cambios constituyen un indicador evidente de duraminización, pero desde el punto de vista fisiológico el duramen no está limitado a las especies en las que puede distinguirse macroscópicamente. En todas las especies, las células del parénquima acaban muriendo y, por tanto, la formación de duramen es un proceso natural de envejecimiento de los árboles. La madera de mobila debe sus propiedades a su elevada proporción de duramen. A menudo, los ataques que ha sufrido de agentes xilófagos son superficiales y principalmente afectan a la albura, no al duramen. La madera que se instala en la actualidad tiene, proporcionalmente, más porcentaje de albura, y por eso su resistencia mecánica y frente a xilófagos es muy inferior a la de la mobila.

2. Fichas técnicas de las principales tecnologías de evaluación no destructiva

Se recopiló información técnica respecto a las tecnologías de evaluación no destructiva (NDT) y su posible uso en madera estructural. Para ello se recurrió 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 recopilaron patentes relacionadas con esas tecnologías. Se analizó 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 prepararon completas fichas técnicas que resumen la información obtenida. Después, a partir de éstas, se prepararon fichas resumidas que están disponibles pública y gratuitamente en la página electrónica de AIDIMME y que se usan, entre otros recursos, para la transferencia y promoción de resultados a empresas y entidades valencianas.

A continuación se detallan las técnicas no destructivas estudiadas.

Técnica 1: Georradar

Principio físico: 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).

Aplicación: Medida de la densidad; medida de la humedad; detección de huecos y cavidades ocultos.

Técnica 2: Microondas

Principio físico: 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, la pérdida dieléctrica, la amplitud, la fase, y la polarización de la onda en el medio.

Aplicación: Medida de la densidad; medida de la humedad; detección de huecos y cavidades ocultos.

Técnica 3: Resistografía

Principio físico: Resistencia que opone la madera a la penetración mediante un taladro de pequeño diámetro.

Aplicación: Medida indirecta de la densidad; detección y ubicación precisa de nudos; detección y ubicación precisa de defectos y singularidades (huecos, fendas, bolsas de resina, etc.), además de degradaciones por xilófagos.

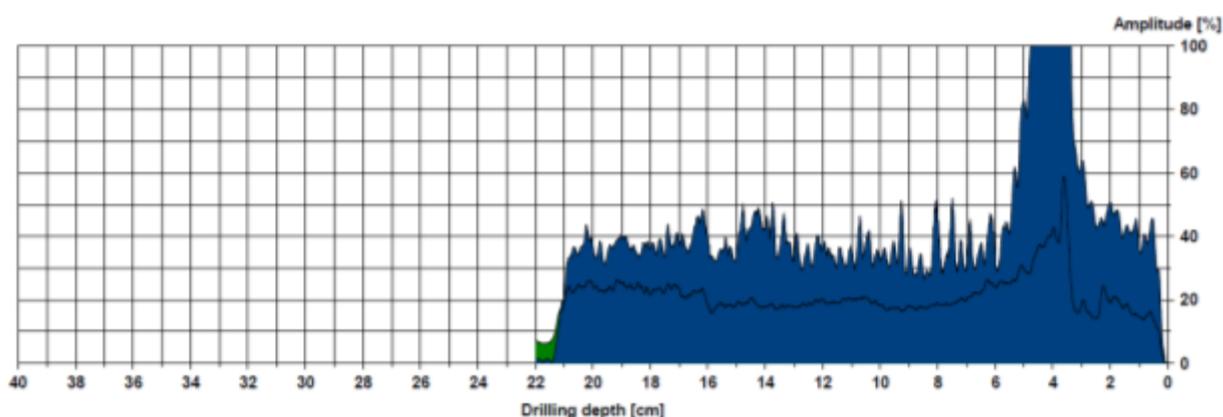


Imagen 4. Perfil resistográfico de una vigueta de madera. Entre los 3 y 5 cm de profundidad hay un nudo.

Técnica 4: Radiación de rayos X

Principio físico: Absorción de rayos X en cada zona del elemento analizado.

Aplicación: Medida de la densidad media y obtención del perfil de densidad de la pieza analizada; detección y ubicación precisa de huecos y cavidades ocultas; detección y ubicación precisa de nudos.

Técnica 5: Ultrasonidos

Principio físico: Propagación de una onda ultrasónica en el elemento analizado y medida del tiempo de vuelo de la onda.

Aplicación: Determinación del módulo de elasticidad y de la resistencia a flexión; detección indirecta de defectos (huecos, fendas, etc.); detección indirecta de nudos.

Técnica 6: Vibraciones inducidas/ondas de presión

Principio físico: 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.

Aplicación: Determinación del módulo de elasticidad y de la resistencia a flexión; detección indirecta de defectos (huecos, fendas, etc.); detección indirecta de nudos.

Técnica 7: Penetrometría

Principio físico: Introducción a presión de una varilla metálica en la madera con una energía prefijada.

Aplicación: Medida de la densidad; detección indirecta de defectos (huecos, ataques de xilófagos, etc.).

Técnica 8: Extracción de tornillos

Principio físico: Arranque de tornillos previamente clavados en la madera.

Aplicación: Medida de la densidad; detección indirecta de defectos (huecos, ataques de xilófagos, etc.).

Técnica 9: Termografía

Principio físico: Conductividad térmica de la madera.

Aplicación: Detección de humedades; detección de defectos y degradaciones próximos a la superficie.

TÉCNICA 2: MICROONDAS

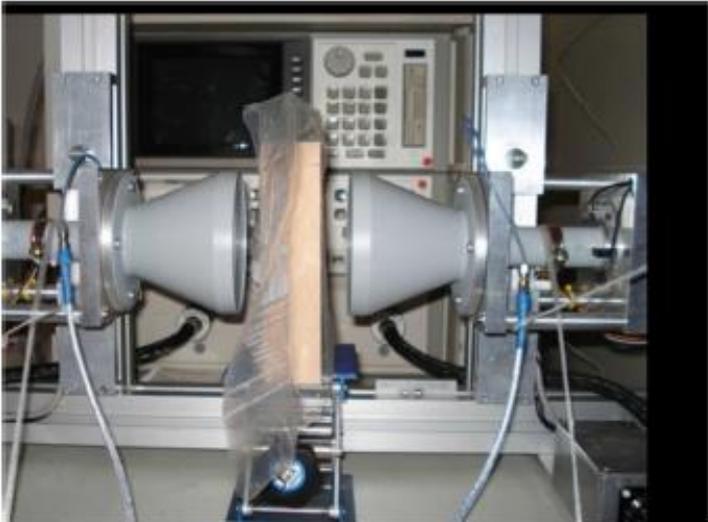
TÉCNICA:	MICROONDAS
<p>Definición</p>	<p>Esta técnica permite formar imágenes de la estructura de un material basándose en la determinación de sus propiedades dieléctricas. Para interpretar correctamente las imágenes de microondas es necesario conocer la respuesta del material a los campos eléctricos 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>  <p><i>Ensayo de una vigueta de madera con un dispositivo experimental de microondas. Fuente: Aichholzer et al. (2013)</i></p>
<p>Resultados que proporciona</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>Ventajas</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Tiene una alta capacidad de penetración y proporciona buenos resultados de la estructura interna de la madera. • Detecta huecos y cavidades ocultos en el interior de la madera. • Determina con precisión la humedad de la madera. • No necesita un contacto directo con el elemento que se analiza. • Permite obtener medidas en tiempo real en línea.

Imagen 5. Primera hoja de la ficha de la técnica de microondas.

TÉCNICA 4: RAYOS X

TÉCNICA:	RAYOS X
<p>Definición</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> Fuente: Microtec.</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>

Imagen 6. Primera hoja de la ficha de la técnica de rayos X.

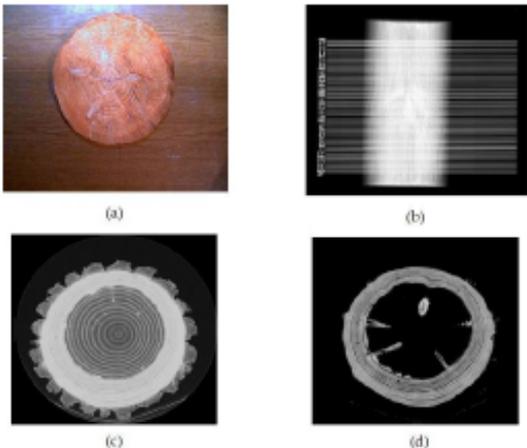
<p>Resultados que proporciona</p>	<p>En el caso de las imágenes digitales, suele usarse la escala de unidades de Hounsfield (HU en inglés) que se obtiene de transformar la escala de coeficientes de atenuación lineal de los rayos X en una nueva escala en la que el valor de atenuación del agua pura destilada 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>Ventajas</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Es muy efectiva para determinar la densidad y la existencia de defectos internos con gran precisión. • Con los equipos portátiles digitales de rayos X, es posible su uso para evaluar estructuras <i>in situ</i>. • No es necesario el contacto con el elemento que se desea analizar.
<p>Desventajas y limitaciones</p>	<ul style="list-style-type: none"> • La técnica no es compatible con ambientes sucios, como suelen ser las obras en rehabilitación, y precisa personal cualificado. • Se necesita calibración previa para determinar la densidad de la madera. • Los equipos portátiles de rayos X son caros todavía. • 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. • Es necesaria la protección radiológica del personal que la usa. • 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. • 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. • 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).

Imagen 7. Segunda hoja de la ficha de la técnica de rayos X.

TÉCNICA 6: VIBRACIONES INDUCIDAS/ONDAS DE PRESIÓN

TÉCNICA:	VIBRACIONES INDUCIDAS/ONDAS DE PRESIÓN
Definición	<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>

Imagen 8. Segunda hoja de la ficha de la técnica de vibraciones inducidas/ondas de presión

3. Desarrollo de una metodología de evaluación no destructiva de la madera estructural

Se está terminando de desarrollar una metodología específica, basada en una combinación de criterios visuales y ensayos no destructivos, para clasificar mecánicamente la madera estructural de acuerdo con el CTE.

Esta metodología permitirá determinar las propiedades mecánicas de la madera, tanto antigua como nueva, y clasificarla madera según el sistema de clases resistentes del CTE (en el caso de coníferas, C14, C16, C18, C20, C22, C24, C27, C30, C35, C40, C45 y C50; en el caso de frondosas, D18, D24, D30, D35, D40, D50, D60 y D70).

En Europa, toda la madera para construcción debe estar caracterizada según ese sistema de clases resistentes y llevar el marcado CE.

Los criterios visuales que se emplean para la metodología tienen en cuenta, entre otros parámetros, la proporción de duramen de la madera, así como la cantidad de nudos y su superficie en relación a la superficie total del elemento. Los ensayos no destructivos inicialmente incluidos en la metodología corresponden a resistografías, vibraciones inducidas/ondas de presión y emisión/recepción de ultrasonidos.



Imagen 9. Realización de un ensayo de resistografía, técnica que forma parte de la metodología de evaluación no destructiva que se está acabando de desarrollar.



Imagen 10. Realización de un ensayo de ultrasonidos, técnica que forma parte de la metodología de evaluación no destructiva que se está acabando de desarrollar.



Imagen 11. Rotura de una viga mediante ensayo de flexión según la norma UNE EN 408 para poder comparar los resultados con los obtenidos mediante la metodología en desarrollo de evaluación no destructiva.

En el proyecto están colaborando empresas valencianas, que aportan conocimiento y materiales al proyecto, y que reciben información técnica del proyecto en el marco de la transferencia tecnológica y promoción de los resultados a empresas y profesionales de los sectores de interés. Se celebran reuniones periódicas con ellas.

Los principales resultados de MEND-ME obtenidos hasta el momento están disponibles de forma abierta, pública y gratuita en la página electrónica de AIDIMME.



"Proyecto cofinanciado por los Fondos FEDER, dentro del Programa Operativo FEDER de la Comunitat Valenciana 2014 - 2020"