

2018

MEND-ME

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

Nº Expte: IMDEEA/2018/2

Programa: PROYECTOS DE I+D EN COOPERACIÓN CON EMPRESAS

Paquete de trabajo 8 – Transferencia y promoción de resultados a empresas de la Comunitat Valenciana

Entregable: E.8.6 - Ficha técnica resumen de los resultados alcanzados durante la anualidad 2

Breve descripción.

Resumen técnico de los principales resultados alcanzados en la anualidad 2

Realizado por:
AIDIMME



GENERALITAT
VALENCIANA

TOTS
A UNA
veu

iVACE
INSTITUT VALENCIÀ DE
COMPETITIVITAT EMPRESARIAL

 **UNIÓN EUROPEA**
Fondo Europeo de
Desarrollo Regional
Una manera de hacer Europa

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



MEND-ME

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

Contenido

RESUMEN EJECUTIVO	3
1 OBJETIVO DEL PROYECTO	4
2 RESULTADOS ESPERADOS	7
3 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO.....	8
4 BENEFICIOS DEL PROYECTO PARA LA SOCIEDAD Y EL MEDIO AMBIENTE.....	9
5 RESULTADOS TÉCNICOS	10
6 DIFUSIÓN DEL ENTREGABLE.....	25
Resumen. Conclusiones.....	26

MEND-ME

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

RESUMEN EJECUTIVO

Este documento resume los principales resultados técnicos obtenidos en la segunda anualidad del proyecto (junio 2018-junio 2019), que se han utilizado en la transferencia y promoción de resultados a empresas y entidades valencianas.



GENERALITAT
VALENCIANA

TOTS
A UNA
VEU

IVACE
INSTITUT VALENCIÀ DE
COMPETITIVITAT EMPRESARIAL

UNIÓN EUROPEA
Fondo Europeo de
Desarrollo Regional
Una manera de hacer Europa

*Proyecto cofinanciado por los fondos FEDER,
dentro del Programa Operativo FEDER
de la Comunidad Valenciana 2014 - 2020*

MEND-ME

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

1 OBJETIVO DEL PROYECTO

La segunda anualidad de este proyecto, que consta de tres anualidades, ha sido financiada por el **IVACE** (Instituto Valenciano de Competitividad Empresarial). También ha sido cofinanciada al 50% por el Programa Operativo **FEDER** de la Comunitat Valenciana 2014-2020.

La primera anualidad del proyecto fue financiada también por el IVACE y fondos FEDER.

En primer lugar, el objetivo general del proyecto consiste en **desarrollar una metodología de evaluación no destructiva específica para madera estructural y después aplicarla los elementos estructurales de madera antigua presente en construcción y rehabilitación para caracterizarlos mecánicamente y clasificarlos según el CTE**, prestando especial atención a las especies de madera que se usaron en construcción en la Comunidad Valenciana.

La metodología que se desarrollará podrá aplicarse *in situ* y será específica para la madera antigua, objetivo de los trabajos de rehabilitación; pues tendrá en cuenta las características intrínsecas de ese tipo de madera, así como la presencia de sus defectos y patologías, que ocasionan que los resultados de las tecnologías no destructivas sean muy diferente a los que se obtienen en madera nueva (que tiene menos duramen, menos defectos como nudos, menos patologías o ninguna, etc.).

En segundo lugar, el objetivo general del proyecto consiste en proponer e implantar **productos y soluciones innovadores más efectivas que las actuales para reforzar y consolidar estructuras**, tanto de madera antigua o patrimonial como de madera actual.



Ejemplo de refuerzo mediante injerto en la cabeza de una viga. Fte. AEstudio Arquitectura y Urbanismo

MEND-ME

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



Ejemplo de solución de refuerzo completo (solera de hormigón con malla y conectores) en un forjado de madera.
Fte. CIS-MADEIRA

El proyecto se encuadra perfectamente en la **medida nº 21** del RIS3-CV (Estrategia de Especialización Inteligente para la Investigación y la Innovación en la Comunidad Valenciana) por los siguientes motivos:

- Las tecnologías de evaluación no destructiva se adaptarán a la madera estructural, sea cual sea su longitud, sección y forma, para clasificarla estructuralmente según el CTE sin recurrir a ensayos destructivos, que resultan muy costosos para las PYMEs y ocasionan la destrucción de parte de la estructura a rehabilitar.
- La nueva metodología de evaluación no destructiva estará adaptada específicamente para aplicarse tanto en elementos existentes de madera estructural como en nuevos.
- El conocimiento sobre los sistemas constructivos de madera se aplicará a la mejora de los productos y soluciones actuales de refuerzo y consolidación utilizados en la rehabilitación de edificios.

Los objetivos específicos del proyecto son los siguientes:

- **Investigar tecnologías no destructivas (TND) que evalúen la calidad estructural y la presencia de defectos en la madera nueva y antigua**, de forma que sean fiables.
- **Desarrollar una metodología específica de evaluación no destructiva específica para madera de uso estructural tanto antigua como nueva**, aplicable a cualquier tipo de elemento, sea cual sea su sección y forma, y que sea aplicable *in situ*. Esta metodología incluirá el método de análisis, los criterios de clasificación y requisitos según uso.
- **Probar la metodología desarrollada tanto en madera antigua como en nueva**. Se evaluará en primer lugar la madera nueva que está clasificada por el CTE para posteriormente aplicar la metodología a madera antigua incluyendo sus peculiaridades.
- A partir de los resultados obtenidos, **se mejorará y optimizará la metodología**.
- Aplicar la metodología mejorada a **madera antigua y sistemas constructivos existentes en las rehabilitaciones**. Con la metodología desarrollada, toda esta madera podrá **clasificarse y utilizarse según el CTE**.
- **Crear una base de datos de propiedades mecánicas de las especies de madera usadas en el pasado**.

MEND-ME

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

- **Innovar en las soluciones y productos de refuerzo y consolidación utilizados en la rehabilitación de sistemas constructivos** con madera antigua, mediante el uso de la metodología elaborada y modelos matemático-computacionales.
- **Difundir de forma efectiva el proyecto y sus resultados.**
- **Transferir y promover los resultados a empresas de la Comunidad Valenciana**, escogiendo los canales más adecuados para que la transferencia tenga el mayor impacto posible.

MEND-ME

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

2 RESULTADOS ESPERADOS

Los resultados esperados del proyecto son los siguientes:

- **Un estudio del uso y la conservación de las especies de madera usadas en la actualidad y en el pasado en el sector de la construcción y rehabilitación.**
- **Fichas de las TND** utilizadas en evaluación de madera.
- **Una metodología de evaluación no destructiva específica para madera de uso estructural**, aplicable a madera antigua y nueva, sea cual sea su estado, longitud, sección y forma.
- Una **guía de buenas prácticas** en evaluación no destructiva de la madera antigua.
- Una **base de datos de propiedades mecánicas de las especies de interés en rehabilitación** (densidad, resistencia a flexión, módulo de elasticidad, resistencia a cortante, etc.). Estas propiedades se obtendrán aplicando la metodología anterior a las especies de madera antigua y se vincularán con la clasificación del CTE (clases resistentes).
- **Soluciones y productos innovadores de refuerzo y consolidación** para utilizar en rehabilitación.
- La **evaluación y modelado matemático-computacional de sistemas constructivos con madera antigua** mediante la metodología desarrollada.
- La **difusión** de forma efectiva del proyecto y sus resultados.
- La **transferencia y promoción de los resultados** a empresas de la Comunidad Valenciana.

Los resultados se dirigen al sector de la madera y la rehabilitación.

El principal resultado de la segunda anualidad del proyecto ha sido el **desarrollo y la validación de una metodología de evaluación no destructiva** específica para madera de uso estructural.

MEND-ME

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

3 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

Hasta el momento no existe una caracterización y clasificación de la madera estructural antigua; por lo tanto, existe un desconocimiento generalizado sobre su uso y rehabilitación, así como dudas sobre su seguridad. Los proyectos experimentales de caracterización mecánica y clasificación de madera antigua que actualmente se realizan aún no han conseguido obtener la fiabilidad que se demanda para poderla equiparar a la madera nueva incluida en el CTE.

MEND-ME está planteado para resolver la **necesidad del sector de la construcción y de muchos arquitectos** de disponer de una caracterización mecánica y de una clasificación según el CTE de la madera existente en las edificaciones antiguas. También se ha detectado 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.**

Por otro lado, no se dispone actualmente de una metodología de evaluación no destructiva de la madera estructural adaptada a cualquier tipo de elemento; es decir, de cualquier tamaño, sección y geometría. El sector de la madera y productos derivados evalúa la calidad de la madera seleccionando algunas muestras y sometiéndolas a **ensayos destructivos**, que se realizan en laboratorios con máquinas universales de ensayo de grandes dimensiones, y por tanto no pueden llevarse a cabo *in situ* y resultan en la destrucción de la muestra de ensayo.

Según datos de AIDIMME, el **70% de la madera antigua/patrimonial** que se sustituye en España, principalmente por desconocimiento de su estado o porque superficialmente presenta deterioros, podría bien conservarse o bien rehabilitarse con refuerzos o reparaciones muy localizadas. La madera antigua y patrimonial suele presentar deterioros o degradaciones, de origen biótico o abiótico. Muchas degradaciones son superficiales y no afectan a la resistencia mecánica.

MEND-ME

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

4 BENEFICIOS DEL PROYECTO PARA LA SOCIEDAD Y EL MEDIO AMBIENTE

El **retorno a la sociedad y el fomento de la cohesión del territorio** de la inversión en I+D de MEND-ME se centra en los siguientes aspectos:

- La transferencia del conocimiento adquirido en el proyecto a las empresas y a la sociedad en general, relativo a la madera antigua y patrimonial, supondrá el incremento de la concienciación y formación de los agentes implicados en la conservación y rehabilitación de los edificios, desde los arquitectos y empresas hasta los propietarios.
- La mejora del conocimiento de la madera antigua y de sus técnicas de conservación repercutirá de forma positiva en los proyectos de rehabilitación de edificios antiguos con estructura de madera, al simplificar las evaluaciones de las estructuras y por ende las molestias a los vecinos.
- La aplicación de los resultados del proyecto en edificios patrimoniales de núcleos urbanos de ciudades y pueblos, muy presentes en la Comunitat Valenciana, fomentará la conservación, promoción y la relación entre distintos ayuntamientos con problemas similares. De esta forma se abrirá la puerta a la colaboración entre entidades públicas, lo cual fomenta la cohesión del territorio.

Además, en el **aspecto medioambiental** el proyecto mejorará la sostenibilidad de las obras a realizar en rehabilitación de edificios.

Los aspectos medioambientales más importantes de MEND-ME se refieren a:

- Reducción de los residuos de las obras al disminuir las demoliciones de sistemas constructivos con madera y obra, que suponen en muchos casos un problema de reciclaje y contaminación.
- La conservación de las estructuras también disminuye el uso de nuevos materiales como el hormigón y el acero que tienen un impacto ambiental mayor que el uso de la madera en cuanto al uso del agua o energía se refiere. Además, utilizar madera de origen sostenible hace que el impacto ambiental por la emisión de CO2 sea menor.
- Las soluciones y productos innovadores basados en madera y derivados influirán también de manera positiva en el impacto ambiental y potenciarán el sector local de la madera, muy afectado desde hace años por la crisis de la construcción.

MEND-ME

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

5 RESULTADOS TÉCNICOS

5.1. Introducción

El principal resultado técnico de la segunda anualidad del proyecto ha sido **el desarrollo y validación de una metodología de evaluación no destructiva (END) basada en la combinación optimizada de ensayos no destructivos y criterios visuales** (número de nudos relevantes y tamaño, nudos agrupados, anillos, porcentaje de albura, porcentaje de duramen, etc.).

Esta metodología puede aplicarse *in situ* en elementos ya instalados y permite determinar fiablemente 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.

La metodología es innovadora porque incluye variables como valores obtenidos de perfiles de resistografía, proporción albura/duramen de la madera, etc. Por lo general, el duramen es más denso y por tanto más resistente mecánicamente que la albura. Asimismo, resulta más resistente a agentes xilófagos (termitas, carcoma, hongos de pudrición). La madera en construcción empleada en España ha estado representada mayoritariamente por especies de madera pertenecientes al grupo de las coníferas.

	Clase	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
Propiedades de resistencia en N/mm²													
Flexión	$f_{m,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50
Tracción paralela a la fibra	$f_{t0,k}$	7,2	8,5	10	11,5	13	14,5	16,5	19	22,5	26	30	33,5
Tracción perpendicular a la fibra	$f_{t90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Compresión paralela a la fibra	$f_{c0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	24	25	27	29	30
Compresión perpendicular a la fibra	$f_{c90,k}$	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,5	2,7	2,7	2,8	2,9	3,0
Cortante	$f_{v,k}$	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Propiedades de rigidez en kN/mm²													
Módulo de elasticidad medio en flexión paralela a la fibra	$E_{m,0,mean}$	7,0	8,0	9,0	9,5	10,0	11,0	11,5	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0
Módulo de elasticidad característico en flexión paralela a la fibra (5% percentil)	$E_{m,0,k}$	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4	10,1	10,7
Módulo de elasticidad medio perpendicular a la fibra	$E_{m,90,mean}$	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,38	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53
Módulo de cortante medio	G_{mean}	0,44	0,50	0,56	0,59	0,63	0,69	0,72	0,75	0,81	0,88	0,94	1,00
Densidad en kg/m³													
Densidad característica (5% percentil)	ρ_k	290	310	320	330	340	350	360	380	390	400	410	430
Densidad media	ρ_{mean}	350	370	380	400	410	420	430	460	470	480	490	520
NOTA 1 Los valores dados en esta tabla para la resistencia a tracción, resistencia a compresión, resistencia a cortante, módulo de elasticidad característico en flexión, módulo de elasticidad transversal medio y módulo de cortante medio se han calculado utilizando las ecuaciones dadas en la Norma EN 384. NOTA 2 Los valores de resistencia a tracción se han estimado de forma conservadora teniendo en cuenta que la clasificación se ha realizado partiendo de la resistencia a flexión. NOTA 3 Las propiedades relacionadas en esta tabla son aplicables a la madera que presente un contenido de humedad que corresponde a una temperatura de 20 °C y una humedad relativa del 65%, lo que equivale a un contenido de humedad del 12% para la mayor parte de la especies. NOTA 4 Los valores característicos de resistencia a cortante son para madera sin fendas, de acuerdo a la Norma EN 408. NOTA 5 Las clases pueden aplicarse también a maderas frondosas que presenten un perfil resistente y densidad similares, tales como el chopo o el castaño. NOTA 6 La resistencia a la flexión de canto puede utilizarse también en el caso de flexión de tabla													

Tabla de clases resistentes para coníferas, basadas en ensayos de flexión de canto: valores de resistencia, rigidez y densidad. Fte. Norma UNE-EN 338:2016.

MEND-ME

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

5.2. Metodología desarrollada de END

La metodología desarrollada se basa en la realización de los siguientes ensayos.

5.2.1. Medida y peso del elemento

El elemento de madera se mide y se pesa con los equipos apropiados.

5.2.2. Determinación de la densidad

Se determina la densidad del elemento siguiendo el procedimiento descrito por la norma UNE-EN 408:2011+A1.

5.2.3. Clasificación visual

Se realiza una clasificación visual según lo establecido por la norma española UNE 56544:2011.

En esta clasificación se tienen en cuenta la presencia de las siguientes singularidades o defectos:

- Nudos
- Desviaciones en la dirección de la fibra de la madera
- Anillos de crecimiento
- Fendas
- Médula
- Entrecasco
- Gemas
- Bolsas de resina
- Madera juvenil
- Madera de reacción (madera que ha sufrido tensiones durante el desarrollo del árbol, por vientos frecuentes por ejemplo, y es más quebradiza de lo habitual)
- Acebolladuras

5.2.4. Medición de los nudos

Se realiza la medición de nudos, que constituye parte de la evaluación visual, según lo establecido por la norma UNE EN 1310.

5.2.5. Cálculo del índice CKDR

Este índice contabiliza la nudosidad del elemento de madera, y se calcula con la siguiente ecuación:

$$CKDR = \sum d_i / 2(b+h)$$

Siendo d_i la suma del diámetro de los nudos, b la dimensión de la cara de la viga y h la dimensión del canto de la viga.

MEND-ME

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



Medidas necesarias para calcular el índice CKDR.

5.2.6. Medida de los porcentajes de albura y duramen

Se determinan los porcentajes de albura y duramen que contiene el elemento.



Imagen transversal de una de las vigas utilizadas en el proyecto, de pino negro o *Pinus nigra*, en la que se aprecia a simple vista el duramen (la parte semicircular) y la albura (el resto). Las proporciones de albura y de duramen son dos variables utilizadas en la metodología.

MEND-ME

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



Imagen transversal de una de las vigas utilizadas en el proyecto, de pino silvestre o *Pinus sylvestris*, en la que se aprecia a simple vista el duramen (la parte semicircular) y la albura (el resto). Esta viga tiene una gran proporción de duramen y por lo tanto su densidad es elevada.

5.2.7. Ensayo mediante técnica no destructiva de resistografía

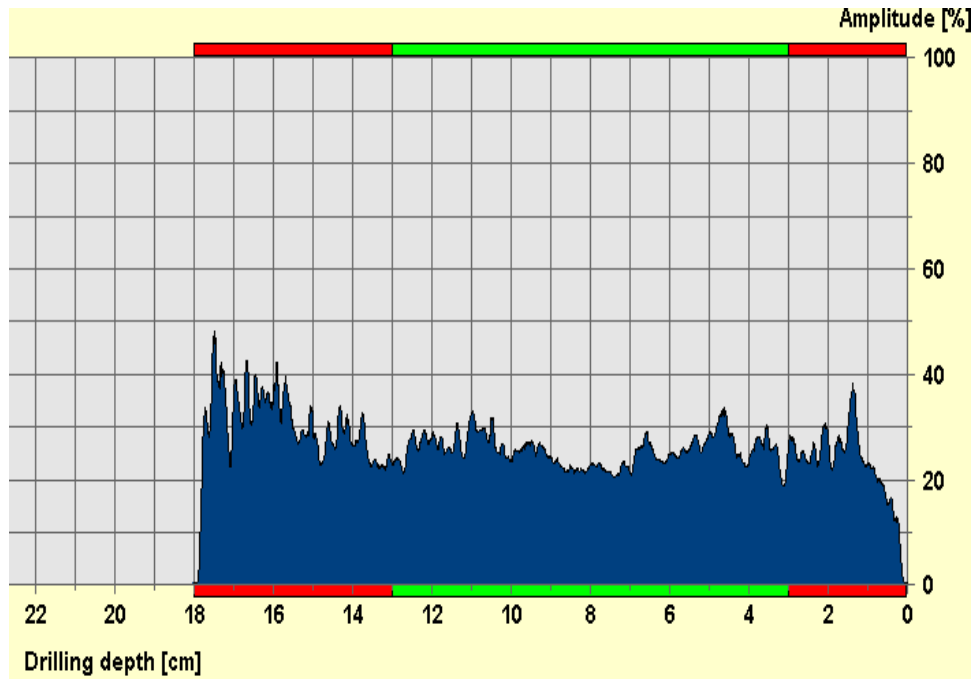
Se realiza el ensayo con un resistógrafo. Del resultado (una gráfica), se obtiene un valor promedio normalizado adimensional mediante algoritmos desarrollados por AIDIMME.



Evaluación no destructiva mediante la técnica de resistografía.

MEND-ME

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



Ejemplo de gráfica de resistógrafo. Las variaciones de la gráfica corresponden a variaciones de densidad de la madera.

5.2.8. Ensayo mediante técnica no destructiva de emisión-recepción de ultrasonidos

Se realiza el ensayo mediante el equipo apropiado y se registra la velocidad de la onda ultrasónica y el módulo de elasticidad (MOE) y de rotura (MOR) dinámicos.



Evaluación no destructiva mediante la técnica de emisión-recepción de ultrasonidos.

MEND-ME

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

5.2.9. Ensayo mediante técnica no destructiva de vibraciones inducidas/ondas de presión

Se realiza el ensayo mediante el equipo apropiado y se registra el MOE dinámico. El MOR dinámico se obtiene mediante algoritmos desarrollados por AIDIMME.



Evaluación no destructiva mediante la técnica de vibraciones inducidas/ondas de presión.

MEND-ME

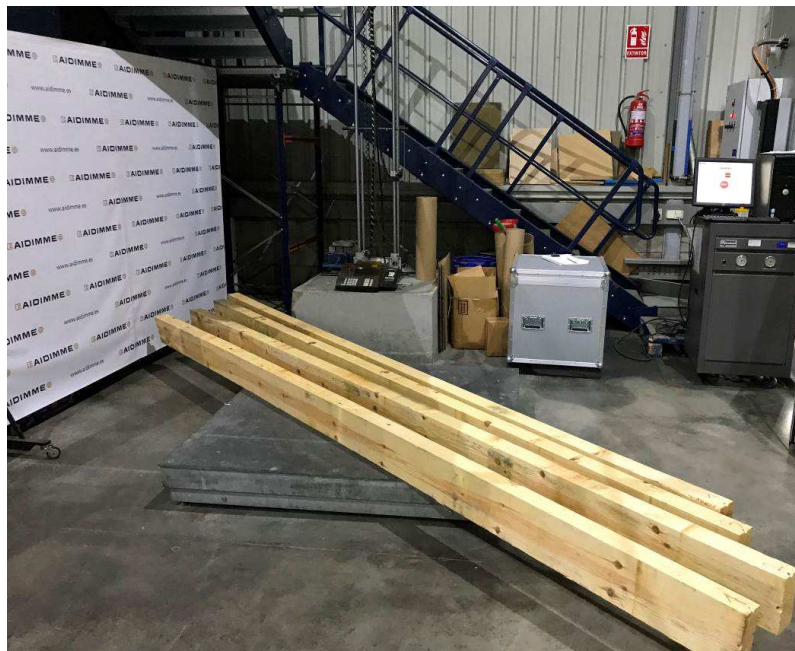
Desarrollo de una metodología para la evaluación no destructiva de madera estructural y aplicación innovadora a rehabilitación

5.3. Validación de la metodología desarrollada de END

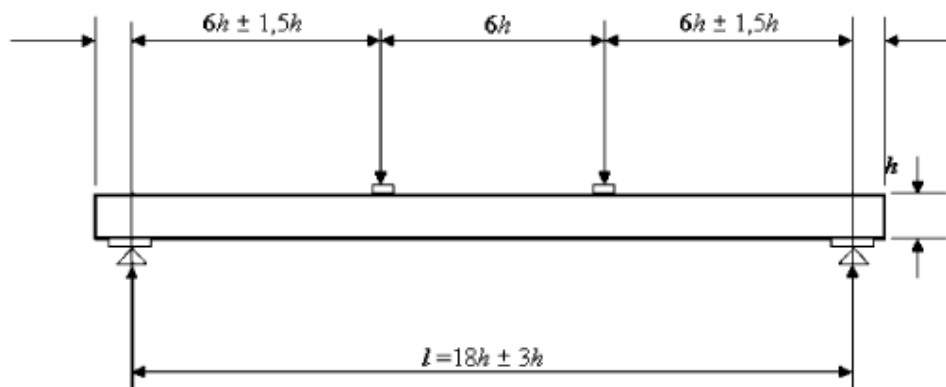
Una vez desarrollada la metodología de evaluación no destructiva, se validó y probó comparando sus predicciones/resultados con los resultados obtenidos del ensayo destructivo a flexión según la norma **UNE-EN 408** (*Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas*).

En concreto, se ensayaron con la metodología desarrollada y con el ensayo destructivo de flexión 15 vigas de pino silvestre, 15 vigas de pino laricio, 15 vigas de pino resinero y 16 vigas de pino carrasco. Todas ellas tenían unas dimensiones nominales de 108 x 80 x 4000 mm.

La madera de estos lotes se acondicionó hasta obtener una humedad de equilibrio higroscópico (HEH) constante y próximo al 12%.



Tres de las vigas de pino silvestre aserradas y acondicionadas para el proyecto se pesan en una báscula calibrada para determinar su densidad.



Esquema del método de ensayo para la determinación del módulo de elasticidad global en flexión y de la resistencia a la flexión axial. Fte. UNE EN 408:2011+A1:2012

MEND-ME

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

Según la norma UNE EN 408, el módulo de elasticidad (MOE) global a flexión se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$E_{m,g} = \frac{3al^2 - 4a^3}{2bh^3 \left(2 \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{6a}{5Gbh} \right)}$$

Siendo:

- a distancia entre un punto de carga y el apoyo más próximo, en mm.
- b anchura de la sección transversal en un ensayo a flexión, o la menor dimensión de la sección transversal, en mm.
- h altura de la sección en los ensayos de flexión, o dimensión mayor de la sección, en mm.
- w deformación en mm.
- l distancia entre apoyos.
- G módulo de elasticidad transversal, en N/mm².
- $w_2 - w_1$ es el incremento de deformación correspondiente a $F_2 - F_1$, en mm.

En el método de la resistencia a la flexión axial, la carga se debe aplicar con una velocidad constante alcanzando la carga máxima en (300±120) s. El cálculo se realiza con la siguiente fórmula:

$$f_m = \frac{3Fa}{bh^2}$$

Siendo:

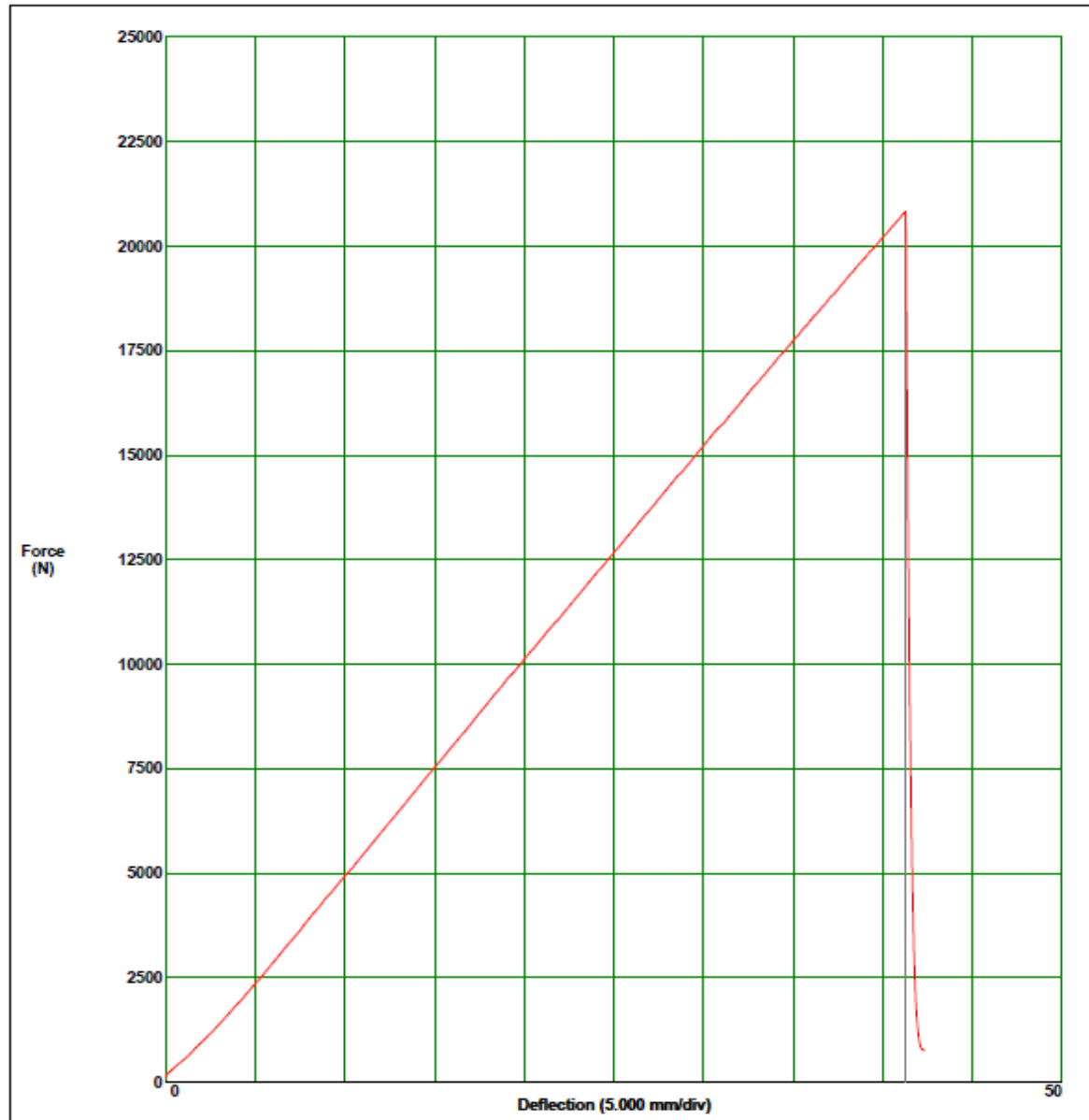
- $F_{m\max}$ carga máxima en Newtons.
- a distancia entre un punto de carga y el apoyo más próximo, en mm.
- b anchura de la sección transversal en un ensayo a flexión, o la menor dimensión de la sección transversal, en mm.
- h altura de la sección en los ensayos de flexión, o dimensión mayor de la sección, en mm.

Las gráficas extraídas de la rotura adoptan el siguiente modelo de gráfica, mostrando la fuerza (en Newtons) sobre el eje ordenadas y el desplazamiento (en mm) sobre el eje de abscisas.

MEND-ME

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

Sample ID	Peak Force (N)	Defl @ Pk (mm)	PreLoad (N)	Test Speed (cm/min)	Temp (deg C)	%RH	Time	Date
Flexion mendime laminada prueba inicial #1	20826	41.27	100.0	1.00	—	—	01:58 PM	05-Dec-17



Gráfica de fuerza y desplazamiento en un ensayo de resistencia a la flexión axial.

Para realizar los ensayos según la norma UNE EN 408, AIDIMME preparó varios utillajes específicos.

MEND-ME

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



Preparación del ensayo de flexión según la norma UNE EN 408.



Vista del ensayo de flexión en un momento próximo a la rotura.

MEND-ME

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



Rotura de una viga de *Pinus nigra* después del ensayo de flexión según la norma UNE EN 408.



Rotura de una viga de *Pinus sylvestris* en el ensayo de flexión según la norma UNE EN 408.

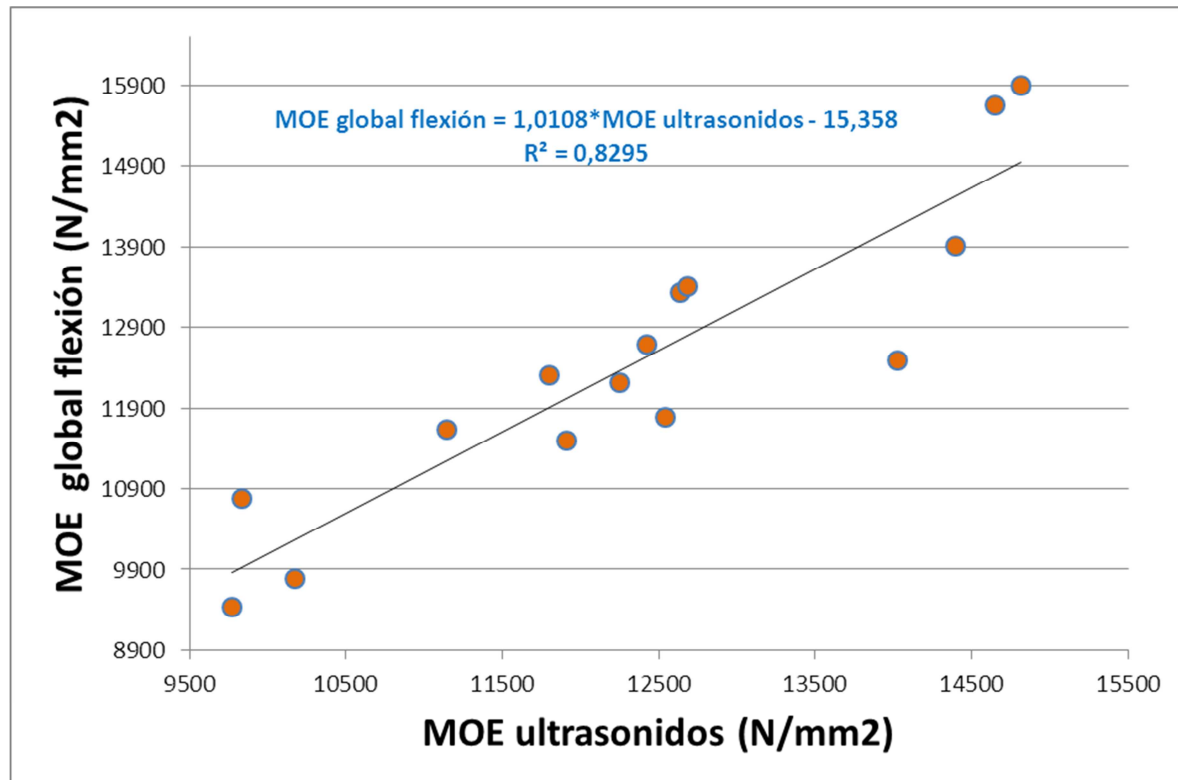
MEND-ME

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

Para el **módulo de elasticidad (MOE)**, se realizaron regresiones lineales entre el resultado del ensayo destructivo y los resultados con las técnicas no destructivas y los parámetros y variables de la metodología.

Estas regresiones se realizaron para cada especie y para las cuatro especies en conjunto. El nivel de significación estadístico fue 0,05. Los resultados se resumen en la siguiente tabla.

Especie	Variables/parámetros estadísticamente significativos de la metodología	Coefficiente de determinación (R^2) de la regresión lineal, en porcentaje
Pino silvestre	Velocidad de ultrasonidos	52
Pino resinero	MOE obtenido mediante emisión-recepción de ultrasonidos	83
Pino laricio	MOE obtenido mediante vibraciones inducidas	86
Pino carrasco	Número total de nudos y MOE obtenido mediante vibraciones inducidas	89
Todos los pinos	Resultado normalizado de resistografía y MOE obtenido mediante vibraciones inducidas	81



Regresión lineal para la especie pino resinero entre MOE global de flexión (ensayo según norma UNE EN 408) y el MOE obtenido mediante emisión-recepción de ultrasonidos. El coeficiente de determinación es muy elevado.

MEND-ME

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

Si en los resultados para el MOE se considera solamente el ensayo no destructivo de emisión-recepción de ultrasonidos, los resultados de las regresiones lineales se muestran en la siguiente tabla.

Especie	Variables/parámetros estadísticamente significativos de la metodología	Coefficiente de determinación (R^2) de la regresión lineal, en porcentaje
Pino silvestre	Velocidad de ultrasonidos	52
Pino resinero	Densidad, resultado normalizado de resistografía, velocidad de ultrasonidos y número total de nudos	95
Pino laricio	Velocidad de ultrasonidos	73
Pino carrasco	Velocidad de ultrasonidos y porcentaje de albura	71
Todos los pinos	Velocidad de ultrasonidos, densidad y porcentaje de duramen	73

Los resultados obtenidos indican una buena capacidad predictiva de las regresiones lineales, pero no tan buena como cuando se incluyen las otras dos técnicas de END, salvo para el caso del pino resinero.

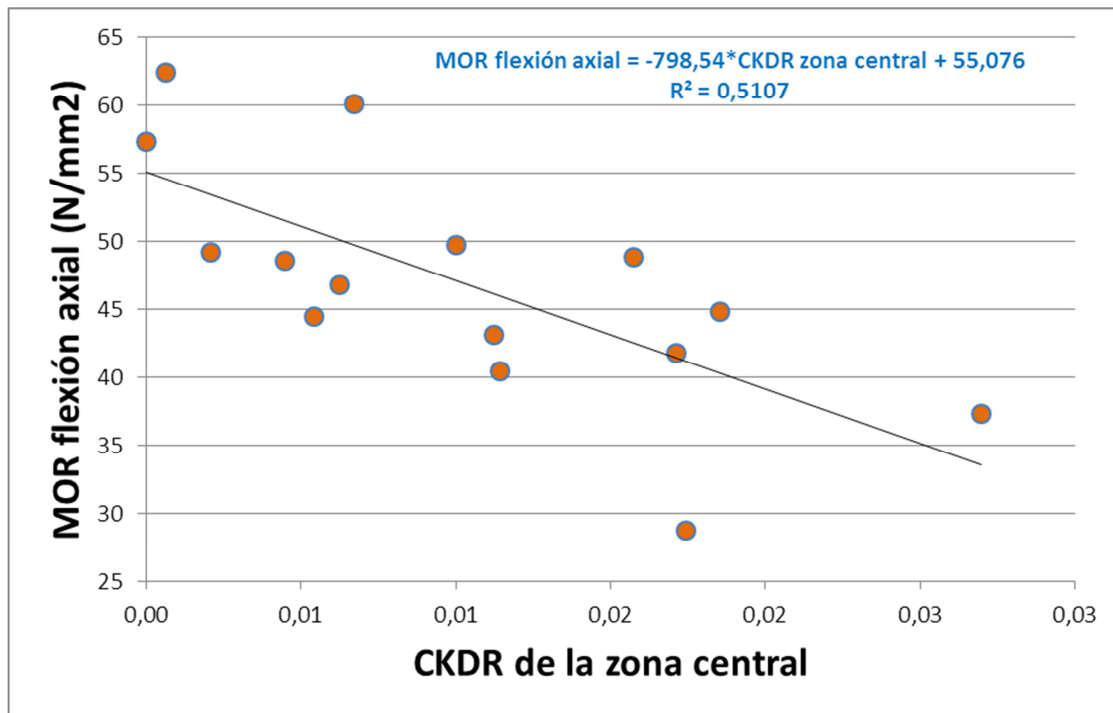
Para la **resistencia a flexión o módulo de rotura (MOR)** se realizaron regresiones lineales entre el resultado del ensayo destructivo y los resultados con las técnicas no destructivas y los parámetros y variables de la metodología.

Estas regresiones se realizaron para cada especie y para las cuatro especies en conjunto. El nivel de significación estadístico fue 0,05. Los resultados se resumen en la siguiente tabla.

Especie	Variables/parámetros estadísticamente significativos de la metodología	Coefficiente de determinación (R^2) de la regresión lineal, en porcentaje
Pino silvestre	CKDR de la viga completa	57
Pino resinero	CKDR de la zona central de la viga y porcentaje de albura	72
Pino laricio	CKDR de la zona central de la viga	51
Pino carrasco	Velocidad de ultrasonidos y MOR obtenido mediante vibraciones inducidas	77
Todos los pinos	CKDR de la viga completa, MOR obtenido mediante vibraciones inducidas, MOR obtenido mediante ultrasonidos y número total de nudos.	71

MEND-ME

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



Regresión lineal para la especie pino laricio entre MOR flexión axial (ensayo según norma UNE EN 408) y el MOR obtenido mediante emisión-recepción de ultrasonidos. El coeficiente de determinación es aceptable.

Si en los resultados para el MOR se considera solamente el ensayo no destructivo de emisión-recepción de ultrasonidos, los resultados de las regresiones lineales se muestran en la siguiente tabla.

Especie	Variables/parámetros estadísticamente significativos de la metodología	Coeficiente de determinación (R²) de la regresión lineal, en porcentaje
Pino silvestre	CKDR de la viga completa	57
Pino resinero	CKDR de la zona central y porcentaje de albura	72
Pino laricio	CKDR de la zona central	51
Pino carrasco	CKDR de la viga completa, resultado normalizado de resistografía y porcentaje de duramen	71
Todos los pinos	CKDR de la viga completa y número total de nudos	60

Para el MOR, el resultado del ensayo de ultrasonidos no es relevante (nivel de significación estadístico=0,05). Los resultados obtenidos indican una buena capacidad predictiva de las regresiones lineales, pero no tan buena como cuando se incluyen las otras dos técnicas de END, excepto en los casos del pino silvestre, el pino resinero y el pino laricio.

MEND-ME

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

5.4. Conclusiones

Los resultados obtenidos validan la metodología obtenida y confirman plenamente su efectividad. En todos los análisis estadísticos se ha obtenido un R^2 superior al 50%, y en muchos casos se ha superado el 70%.

Además, en todos los análisis hay variables o parámetros que estadísticamente carecen de significación. Por tanto, puede **simplificarse mucho la metodología** eliminando algunos ensayos. Por ejemplo, para predecir el módulo de elasticidad de todas las especies de pino (tabla de la página 21), la metodología puede reducirse a dos ensayos de los nueve inicialmente previstos: resistografía y vibraciones inducidas. No sería necesario ningún parámetro visual.

Como cabía esperar, la resistencia a flexión o módulo de rotura puede predecirse bastante bien en general con parámetros de la nudosidad del elemento (índice CKDR y número total de nudos).

Actualmente, en el proyecto se está acabando de mejorar la metodología de evaluación no destructiva y se está trabajando en el aprovisionamiento de madera, acondicionamiento y preparación de probetas de ensayo de madera antigua, con el fin posterior de adaptar la metodología mejorada de END a la madera antigua, que presenta propiedades y características ausentes en la madera actual.

MEND-ME

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

6 DIFUSIÓN DEL ENTREGABLE

Según la memoria de solicitud, este entregable es público.

El entregable está disponible de forma abierta, pública y gratuita en la página web de ADIMME (sección “Difusión de proyectos”) y se ha entregado en papel o en formato digital a empresas y entidades cooperadoras e interesadas.

MEND-ME

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

Resumen. Conclusiones

Este documento resume los principales resultados técnicos obtenidos en la segunda anualidad del proyecto (junio 2018-junio 2019).



GENERALITAT
VALENCIANA

TOTS
A UNA
VEU

IVACE
INSTITUT VALENCIÀ DE
COMPETITIVITAT EMPRESARIAL

 UNIÓN EUROPEA
Fondo Europeo de
Desarrollo Regional
Una manera de hacer Europa

*Proyecto cofinanciado por los fondos FEDER,
dentro del Programa Operativo FEDER
de la Comunidad Valenciana 2014 - 2020*

MEND-ME

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

Puede obtener más información y documentación sobre el proyecto escribiendo al correo electrónico redaccion@aidimme.es, o bien contactando con AIDIMME.

Coordinador y director técnico del proyecto: Miguel Ángel Abián

Dpto. Tecnología y Biotecnología de la Madera



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

Organismos financiadores:

Fondos Estructurales, a través del Programa Operativo FEDER de la Comunitat Valenciana 2014-2020

Generalitat Valenciana. IVACE. Instituto Valenciano de Competitividad Empresarial



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