

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

Entregable: E.8.3 - Ficha técnica resumen de los resultados alcanzados durante la anualidad 1

Breve descripción.

Resumen técnico de los principales resultados alcanzados en la anualidad 1

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	4
1 OBJETIVO DEL PROYECTO	5
2 RESULTADOS ESPERADOS	8
3 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO.....	9
4 GRADO DE INNOVACIÓN Y NIVEL TECNOLÓGICO.....	10
5 RESULTADO TÉCNICO 1: ESPECIES DE MADERA UTILIZADAS EN CONSTRUCCIÓN EN ESPAÑA Y SUS CARACTERÍSTICAS	11
5.1 PINUS SYLVESTRIS.....	18
5.1.1 FICHA TECNICA.....	19
5.2 PINUS NIGRA	21
5.2.1 FICHA TECNICA.....	22
5.3 PINUS PINASTER	24
5.3.1 FICHA TECNICA.....	25
5.4 PINUS HALEPENSIS.....	27
5.4.1 FICHA TECNICA.....	28
5.5 MOBILA (o pino amarillo del sur).....	30
5.5.1 FICHA TECNICA.....	32
5.6 POPULUS NIGRA	36
5.6.1 FICHA TECNICA.....	37
5.7 PINUS RADIATA	39
5.7.1 FICHA TECNICA.....	39
5.8 PICEA ABIES	42
5.8.1 FICHA TECNICA.....	43
6 RESULTADO TÉCNICO 2: ESPECIES DE MADERA Y DURABILIDAD NATURAL FRENTE A HONGOS E INSECTOS XILÓFAGOS	45
6.1 DURABILIDAD NATURAL.....	45
6.2 EJEMPLOS DE DURABILIDAD NATURAL	46
7 RESULTADO TÉCNICO 3: USO DE LA MADERA EN CONSTRUCCIÓN Y REHABILITACIÓN... 50	50
7.1 INTRODUCCIÓN: USO DE LA MADERA EN EL PASADO.....	50
7.2 MADERA ESTRUCTURAL ENTRE LOS SIGLOX XV Y FINALES DEL SIGLO XIX.....	51
7.3 MADERA ESTRUCTURAL ENTRE FINALES DEL SIGLO XIX Y LA GUERRA CIVIL	58
7.4 MADERA ESTRUCTURAL DESDE LA GUERRA CIVIL.....	63
8 RESULTADO TÉCNICO 4: TÉCNICAS DE EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVA DE LA MADERA 64	64
8.1 INTRODUCCIÓN	64
8.2 TÉCNICA 1: GEORRADAR	66

MEND-ME

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

8.3	TÉCNICA 2: MICROONDAS	68
8.4	TÉCNICA 3: RESISTOGRAFÍA.....	70
8.5	TÉCNICA 4: RAYOS X.....	72
8.6	TÉCNICA 5: ULTRASONIDOS.....	74
8.7	TÉCNICA 6: VIBRACIONES INDUCIDAS/ONDAS DE PRESIÓN	76
8.8	TÉCNICA 7: PENETROMETRÍA	78
8.9	TÉCNICA 8: EXTRACCIÓN DE TORNILLOS	80
8.10	TÉCNICA 9: TERMOGRAFÍA DE INFRARROJOS.....	82
9	DIFUSIÓN DEL ENTREGABLE.....	84
	Resumen. Conclusiones.....	85



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 primera anualidad del proyecto (enero 2017-mayo 2018), 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 primera anualidad de este proyecto ha sido financiada por el **IVACE** (Instituto Valenciano de Competitividad Empresarial). También ha sido cofinanciado al 50% por el Programa Operativo **FEDER** de la Comunitat Valenciana 2014-2020.

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 producto de refuerzo (madera microlaminada) en la parte superior de una cercha deteriorada de madera. Fte. CIS-MADEIRA

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.



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.



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

4 GRADO DE INNOVACIÓN Y NIVEL TECNOLÓGICO

La **innovación del proyecto** radica en varios aspectos:

- El desarrollo y validación de una **metodología de evaluación no destructiva** específica para madera estructural antigua, aplicable a cualquier tipo de elemento, independientemente de su sección y forma geométrica. Esta metodología evitará a las empresas realizar ensayos destructivos y podrá usarse *in situ*.
- La caracterización mecánica y la clasificación según el CTE de las especies de madera antigua mayormente usadas en el pasado. Esta caracterización se traducirá en una **base de datos de propiedades mecánicas** para uso de arquitectos e ingenieros.
- La **innovación en soluciones y productos de refuerzo y consolidación utilizados en la rehabilitación de sistemas constructivos y su aplicación práctica**.
- El **modelado matemático-computacional de estructuras de madera antigua** con sus peculiaridades (nudos, degradaciones por xilófagos, refuerzos puntuales, secciones y formas variantes, etc.) es **totalmente novedoso para el sector de la arquitectura**.

Los resultados del proyecto serán **relevantes para el estado de conocimiento en madera y específicamente en madera para uso arquitectónico e ingenieril**, porque permitirán caracterizar y clasificar para construcción la madera existente en la edificaciones antiguas y porque permitirán mejorar las soluciones actuales aplicadas en rehabilitación de madera.

La **base de datos de propiedades mecánicas de la madera antigua** (densidad, resistencia a flexión, resistencia a cortante, resistencia a compresión, módulo de elasticidad, etc.), inexistente hasta la fecha, permitirá a los ingenieros y arquitectos realizar con fiabilidad cálculos estructurales por elementos finitos en elementos de madera de las especies de interés.

Además, la **relevancia técnica e industrial** de los resultados será elevada porque:

- La nueva metodología de evaluación no destructiva podrá ser utilizada por las PYMEs, para las cuales resultan muy costosos los ensayos destructivos.
- Los arquitectos e ingenieros podrán utilizar la base de datos de propiedades mecánicas para hacer cálculos estructurales con seguridad.
- Las nuevas soluciones y productos de refuerzo y consolidación proporcionarán **ventajas técnicas y económicas** a las empresas dedicadas a rehabilitación dada su aplicación a sistemas constructivos reales.

El proyecto se ubica en un TRL inicial 1-2, porque comienza con un estudio del arte en evaluación no destructiva y con la adquisición de conocimientos sobre las posibilidades de esas técnicas. **Y se ubica en un TRL final 6**, pues la metodología de evaluación no destructiva y las nuevas soluciones y productos de refuerzo y consolidación se desarrollarán y validarán para sistemas constructivos existentes y se probarán en condiciones reales (edificios, estructuras, etc.).

Por tanto, **en el proyecto existe un avance considerable en el nivel de innovación técnica**.

MEND-ME

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

5 RESULTADO TÉCNICO 1: ESPECIES DE MADERA UTILIZADAS EN CONSTRUCCIÓN EN ESPAÑA Y SUS CARACTERÍSTICAS

La madera en construcción empleada en España ha estado representada mayoritariamente por especies de madera pertenecientes al grupo de las coníferas.

Durante el proyecto, mediante las investigaciones realizadas por AIDIMME en estructuras de madera sometidas a procesos de rehabilitación e intervención, se han recopilado suficientes datos como para afirmar que las especies de coníferas empleadas en construcción han sido ***Pinus halepensis***, ***Mobila*** (o pino amarillo del sur; varias especies), ***Pinus nigra***, ***Pinus sylvestris***, ***Pinus pinaster***, ***Pinus radiata*** y ***Picea abies***. Como frondosa, se ha utilizado principalmente ***Populus nigra***.

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



Elementos apeados de la estructura de un edificio histórico en Denia para su análisis en el proyecto. Fte. AIDIMME

MEND-ME

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



Análisis para el proyecto de la madera existente en una masía de Vall d'Alba. Fte. AIDIMME

La madera es un material tradicional y el patrimonio histórico valenciano está construido en su mayor parte con madera, total o parcialmente. Además, su uso estructural ha predominado en el resto de edificaciones. La reducción del uso de la madera como material estructural se produjo en los últimos 60 años, debido al desconocimiento de este material y a la inexistencia de calidades normalizadas y de métodos objetivos de clasificación. Por ello, actualmente el Código Técnico de la Edificación actualmente contempla la madera como un material para uso estructural como otro cualquiera, sometido a las mismas exigencias que el resto.

La madera en construcción presenta una serie de características que hacen de ella un material de excelentes propiedades. Una de ellas es la **eficiencia energética** por el poco gasto energético que necesita para su fabricación y transformación. De hecho se considera que 1 m³ de madera reduce en 1,1 t las emisiones de CO₂ y almacena a un 0,9 t de CO₂, es decir que la madera ahorra un total de 2 t de CO₂. Otras propiedades que caracterizan a la madera para uso en construcción es que se trata de un material **ligero y resistente a la vez**, presenta un **excelente comportamiento frente al fuego**, presenta un amplio abanico de **durabilidades** en función del uso final, es un material **confortable** (buen aislante acústico y térmico), se fabrica una amplia variedad de **tableros** como revestimientos decorativos o aislamientos, es **valorizable** (se puede reutilizar, reciclar, se obtiene energía).

En el sector de estructuras de madera en construcción hay que distinguir las realizadas con madera aserrada y las realizadas con madera laminada encolada.

MEND-ME

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

Hay muy pocas carpinterías que realizan estructuras de madera aserrada, en su mayoría son artesanales, normalmente se encuentran situadas en el norte de España, en donde todavía se mantiene viva la tradición de utilizar madera en las cubiertas de viviendas unifamiliares.

El sector más ligado a las aplicaciones de las estructuras de madera aserrada, es el de la construcción de viviendas de madera. Este, ha tenido en los 2 últimos años un importante (aunque relativamente pequeño) auge.

Existen alrededor de 40 o 50 empresas relacionadas con la construcción de viviendas de madera. Probablemente sólo un 20 o 25% son fabricantes nacionales, un 50% son importadores y el resto son constructoras que emplean la madera como sistema constructivo. Se trata de empresas pequeñas que subcontratan las labores de montaje. Resulta difícil calcular el volumen de actividad, pero es previsible su crecimiento.

Este sector está teniendo un gran auge y tiene una gran proyección de futuro, sobre todo en la construcción de grandes superficies como son los hipermercados, polideportivos y piscinas.

Hace tan sólo 9 años eran prácticamente nulas las referencias de nuevas obras realizadas con estructuras de madera laminada. En un principio fueron introducidas por los fabricantes de países vecinos, como Francia, y ahora es compartida con los fabricantes nacionales establecidos.

Actualmente, además de los pocos fabricantes nacionales, se han introducido varias empresas francesas (entre ellas las 3 más relevantes). Orientativamente el reparto del mercado puede estar alrededor del 50% (Nacional-Importación). El número de obras realizadas con este sistema constructivo superará probablemente las 300 o 400, representando una superficie construida de 500.000 m². El volumen de mercado anual puede representar alrededor de 5.000 a 8.000 m³.

A continuación, se muestran los datos del balance del uso de la madera en rollo del 2005 y 2013 según el uso final. Se desglosa la procedencia del material desde exportaciones, extracciones e importaciones a nivel nacional. Se observa como el consumo de madera de coníferas es superior en el caso de la fabricación de tableros en la madera de sierra. En el caso de usos bioenergéticas, pasta para papel y postes y derivados la madera de frondosas es la más consumida (Ministerio MAPAMA/Avance estadística forestal 2014. Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación y Medio Ambiente)

MEND-ME

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

BALANCE DE LA MADERA 2005 (M3 S.C.EQUIVALENTES)

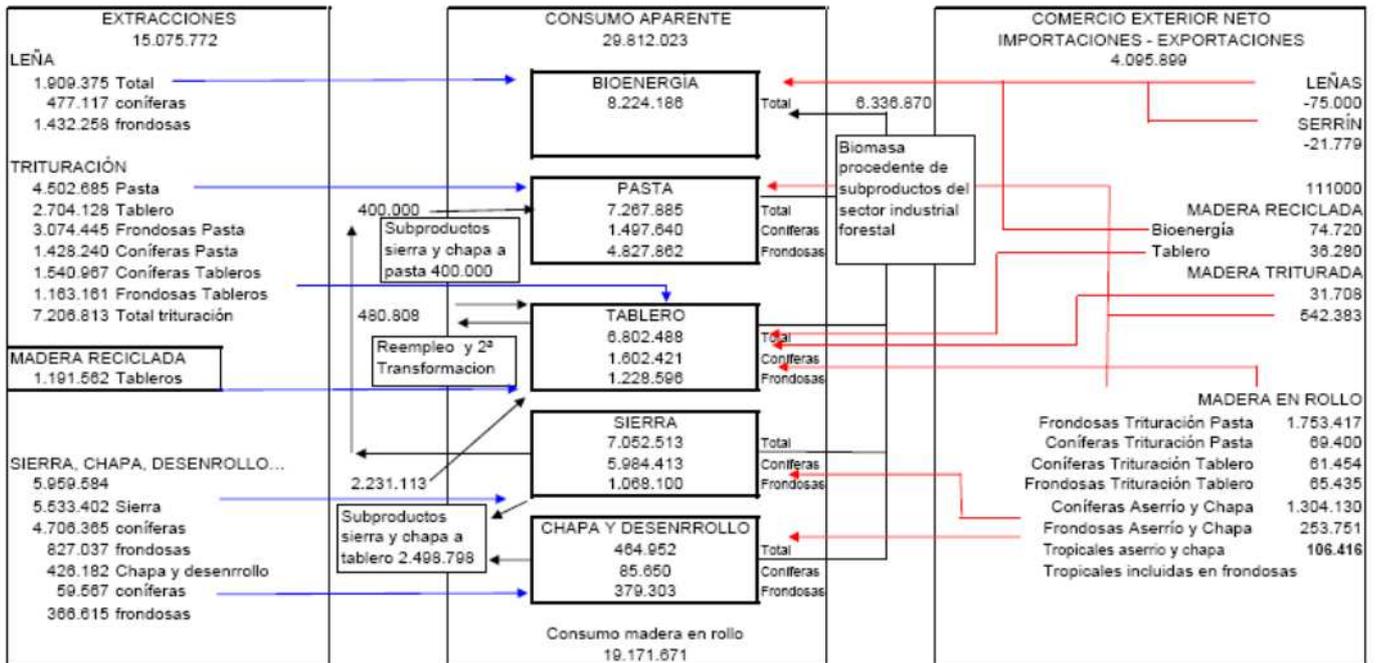


Gráfico del balance del uso de madera en rollo en 2005 atendiendo a su uso final. Fte. Ministerio MAPAMA/Avance estadística forestal 2014

BALANCE DE LA MADERA EN ROLLO 2013 (M3 S.C.EQUIVALENTES)

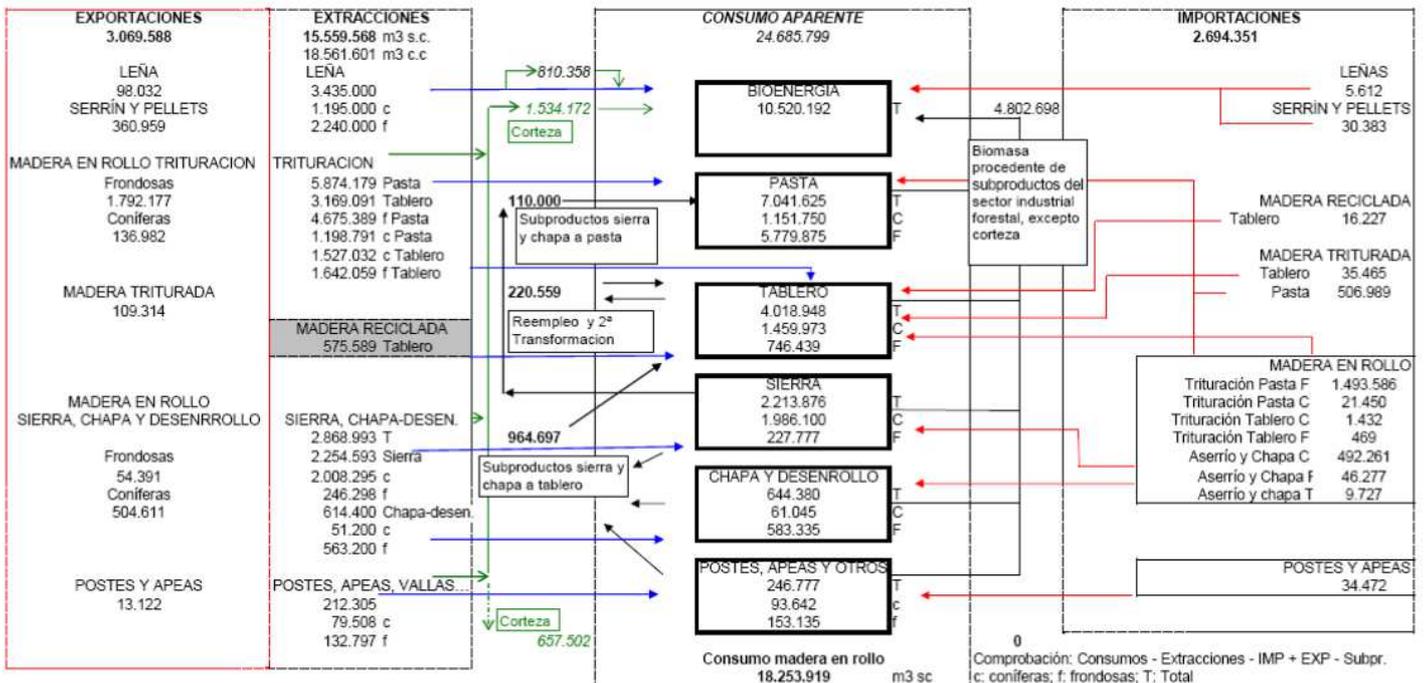


Gráfico del balance del uso de madera en rollo en 2013 atendiendo a su uso final. Fte. Ministerio MAPAMA/Avance estadística forestal 2014

MEND-ME

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

De la misma madera, de los datos obtenidos de la misma fuente (Anuario Estadística Forestal 2014 del MAPAMA) puede observarse que la importación de madera aserrada de coníferas resulta superior a la exportación, por lo que la mayoría de la madera empleada en el sector de la construcción procede de países extranjeros.

Madera, leña, tablero, pasta, papel y otros productos: Producción y Comercio exterior de España, 2013						
Productos	Unidad	Producción y extracciones	Importaciones		Exportaciones	
			Cantidad	Valor (miles de euros)	Cantidad	Valor (miles de euros)
LEÑAS	1000 m3	3.030	6	204	98	12.425
INDUSTRIAL (TROZAS PARA TRITURACIÓN, ASERRÍO Y CHAPA)	1000 m3	12.323	2.047	114.086	2.488	155.697
Coníferas	1000 m3	4.855	498	19.424	642	21.272
Fronosas	1000 m3	7.468	1.550	94.662	1.847	134.426
CARBÓN VEGETAL	1000 t	48	23	8.650	28	12.209
ASTILLAS, PARTÍCULAS Y RESIDUOS	1000 m3	3.226	538	40.157	424	25.974
PELETS Y OTROS AGLOMERADOS	1000 m3	250	38	6.247	47	12.379
MADERA ASERRADA	1000 m3	2.047	828	182.036	153	42.488
Coníferas	1000 m3	1.662	710	113.198	132	25.060
Fronosas	1000 m3	385	118	68.838	22	17.429
TABLEROS DE MADERA	1000 m3	2.935	919	302.855	1.844	567.409
Hojas de chapa	1000 m3	111	79	76.809	42	63.447
Tableros contrachapados	1000 m3	275	68	32.718	169	145.792
Tableros de partículas, incluidos	1000 m3	1.469	393	83.505	611	131.815
Tableros de fibras	1000 m3	1.229	379	109.822	1.021	226.355
PASTA DE PAPEL (DE MADERA)	1000 t	1.929	1.119	563.044	1.184	702.944
Mecánicas	1000t	90	5	3.927	26,90	8.537
Semiquímicas	1000t		42	20.146	0	0
Químicas	1000t	1.865	1.061	529.674	1.138	681.671
Al sulfato, crudas	1000t	188	1	1.064	0	0
Al sulfato, blanqueadas	1000t	1.630	958	484.388	1.138	681.602
Al bisulfito, crudas	1000t		0,14	83	0	0
Al bisulfito, blanqueadas	1000t		102	44.139	0,04	69
Solubles	1000t	22	11	9.298	19	12.736
OTROS TIPOS DE PASTA	1000 t	5.563	6	4.620	16	31.571
Pastas de otras fibras	1000 t	1.113	3	2.879	15	31.167
Pasta de fibra recuperada	1000 t	4.450	3	1.740	1	404
PAPEL RECUPERADO	1000 t	4.266	1.544	216.043	666	88.399
PAPEL Y CARTÓN	1000 t	6.107	2.822	2.150.567	2.908	2.036.169
Papel con fines gráficos	1000t	1.498	1.234	948.156	1.259	866.165
Papel doméstico y sanitario	1000t	707	52	66.030	77	74.209
Material para empaquetar	1000t	3.629	1.481	1.066.081	1.532	934.359
Otros papeles y cartones	1000t	348	55	70.300	40	161.436

Tabla de producción y comercio exterior de madera, leña, tablero, pasta, papel y otros productos (2013). Fte. Ministerio MAPAMA/Anuario Estadística Forestal 2014

En cuanto a los aprovechamientos forestales, las cortas de madera por especie en m³ se muestran a continuación (Anuario Estadística Forestal 2014 del MAPAMA) siendo las de *P. pinaster*, *P. radiata* y *P. sylvestris* las que mayor volumen se extrae. En cuanto a la frondosa encontrada en madera en construcción *Populus nigra* (chopo) se observa que el volumen de

MEND-ME

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

extracción queda en segundo lugar tras el eucalipto, aunque su uso en construcción es actualmente prácticamente nulo.

APROVECHAMIENTOS FORESTALES. CORTAS DE MADERA POR ESPECIE

Volumen de cortas por especie 2014 (m3 con corteza)

CONÍFERAS	Especies principales	Volumen cortado (m3 con corteza)
Indicadores: % respecto del total de cortas 55,70% % coníferas alóctonas respecto total del coníferas: 27,72%	<i>Pinus pinaster</i>	3.641.620
	<i>Pinus radiata</i>	2.369.493
	<i>Pinus sylvestris</i>	1.404.859
	<i>Pinus nigra</i>	500.607
	<i>Pinus pinea</i>	294.322
	<i>Pinus halepensis</i>	290.590
	Otras coníferas alóctonas (<i>Chamaecyparis</i> , <i>Larix</i> , <i>Picea</i> y <i>Pseudotsuga</i>)	64.262
	Otras coníferas	213.699

FRONDOSAS	Especies principales	Volumen cortado (m3 con corteza)
Indicadores: % respecto del total de cortas 44,30% % frondosas alóctonas respecto total del frondosas: 80,26%	<i>Eucalyptus spp.</i>	5.578.331
	<i>Populus spp.</i>	926.622
	<i>Quercus robur</i>	131.163
	<i>Castanea sativa</i>	106.464
	<i>Fagus sylvatica</i>	105.802
	<i>Betula spp.</i>	59.545
	Otros quercus	16.111
	Otras frondosas alóctonas	25.726
	Resto de frondosas	32.673

Tabla de cortas de madera por especie (2014). Fte. Ministerio MAPAMA/Anuario Estadística Forestal 2014

Representando los datos ofrecidos por el Inventario Forestal Español de 2014, puede determinarse qué especies de madera son predominantes según la comunidad autónoma.



Mapa que representa la abundancia de cada especie por provincia y proporcionalidad de las especies sobre el total nacional (tamaño del árbol). Fte. Inventario Forestal Español de 2014

MEND-ME

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

A continuación, se presentan las fichas de las características anatómicas de las principales especies de madera empleadas en construcción en España.

Las fuentes bibliográficas de donde se ha obtenido la información han sido los libros:

- VV.AA. *Especies de madera*. AITIM. 1987. Madrid.
- García, L., Guindeo, A., De Palacios, P. y Peraza, C. *La madera y su tecnología*. AITIM. 2002. Madrid.



MEND-ME

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

5.1 PINUS SYLVESTRIS

El pino silvestre (*Pinus sylvestris*), también conocido como pino de Valsaín, pino serrano, pino albar, pino del Norte, pino rojo o pino de Soria, produce una madera de elevada calidad que se ha usado desde antaño hasta la actualidad. Es una especie que actualmente se utiliza en forma de viguetas macizas y también laminadas.



Imagen de madera vieja de *Pinus sylvestris*. Fte. AIDIMME



Imagen de madera nueva de *Pinus sylvestris*. Fte. AIDIMME

MEND-ME

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

5.1.1 FICHA TECNICA

Nombre científico: *Pinus sylvestris* L.

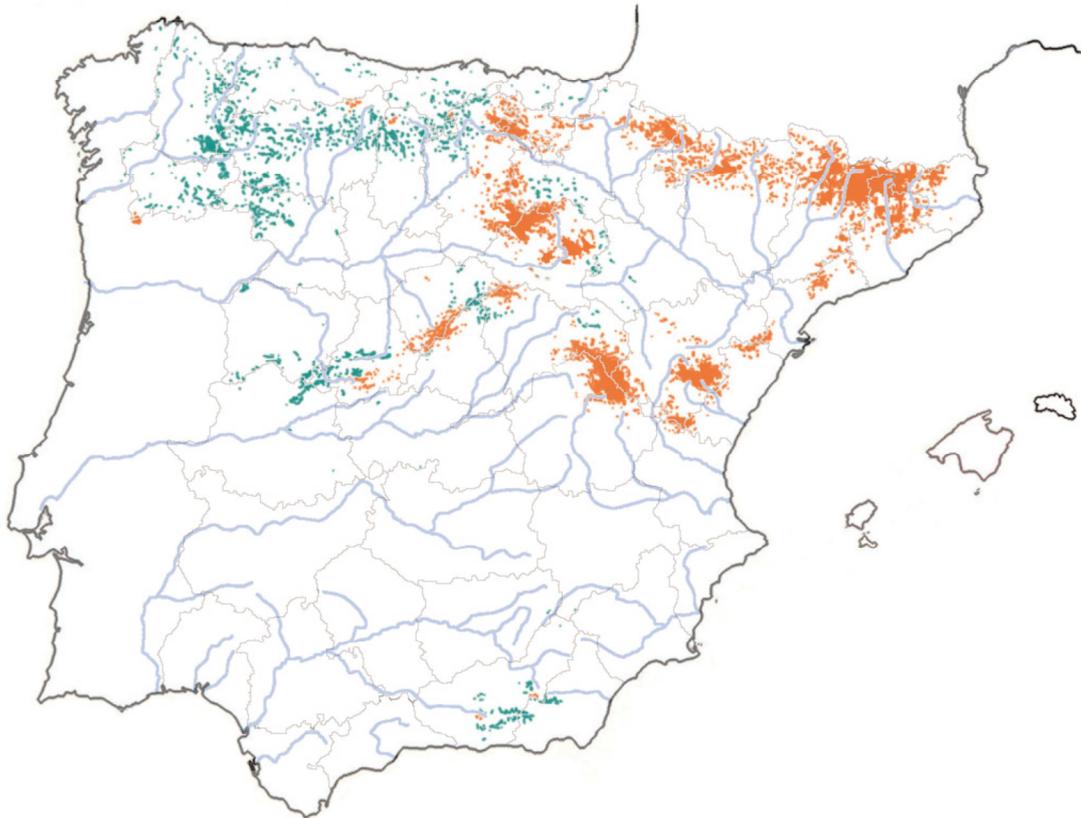
Orden: Coníferas

Familia: Pinaceae

Subfamilia: Pinoideae

Nombre comercial: Pino silvestre

Distribución:



Distribución natural (naranja) y plantaciones (verde) de *Pinus sylvestris*. Fte. Compendio de silvicultura.
Descripción de los caracteres culturales de las principales especies forestales de España

CARACTERISTICAS MACROSCOPICAS

Madera: la madera presenta un color rojizo pálido. Puede producir alergia en las mucosas.

Madera de albura: la madera de albura presenta un color amarillo pálido

Madera de duramen: presenta un color rojizo

Anillos de crecimiento: muy diferenciados. Los anillos de verano presentan un espesor entre 1,5-3 mm (1).

Densidad media al 12% de humedad: 0,500-0,540 g/cm³

MEND-ME

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

PROPIEDADES MECÁNICAS (AITIM, 1997)

DENSIDAD (kg/m³)	500-540
CONTRACCION	Poco nerviosa
COEFICIENTE DE CONTRACCION TOTAL (%)	VOLUMETRICA: 120,9
	TANGENCIAL: 6,8
	RADIAL: 3,8
DUREZA	2
FLEXION ESTATICA (N/mm²)	90-110
MODULO DE ELASTICIDAD (N/mm²)	8600-10.000
COMPRESION AXIAL (N/mm²)	42-47
COMPRESION PERPENDICULAR (N/mm²)	9,2
CORTANTE (N/mm²)	10-11
FLEXION DINAMICA (J/cm²)	2,25

MEND-ME

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

5.2 PINUS NIGRA

El pino salgareño (*Pinus nigra* Arnold) es una especie arbórea de la familia de las pináceas. También se conoce como pino laricio y pino negral. Es una de las especies más extendidas por la península y utilizada en construcción desde la antigüedad gracias a sus buenas propiedades mecánicas. En la actualidad su uso se restringe a viguetas de madera maciza.



Imagen de duramen de madera vieja de *Pinus nigra*. Fte. AIDIMME



Imagen de madera nueva de *Pinus nigra*. Fte. AIDIMME

MEND-ME

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

5.2.1 FICHA TECNICA

Nombre científico: *Pinus nigra* J.F. Arnold

Orden: Coníferas

Familia: Pinaceae

Subfamilia: Pinoideae

Nombre comercial: Pino laricio

Distribución:



Distribución natural (naranja) y plantaciones (verde) de *Pinus nigra*. Fte. Compendio de silvicultura. Descripción de los caracteres culturales de las principales especies forestales de España

CARACTERÍSTICAS MACROSCÓPICAS

Madera: es una madera resinosa por lo que presenta un fuerte olor a resina.

Madera de albura: la madera de albura presenta una coloración amarilla.

Madera de duramen: presenta un color rojo pálido

Anillos de crecimiento: Muy diferenciados con una transición muy contrastada entre la madera de primavera (1) y la de verano.

Densidad media al 12% de humedad: 0,510-0,650 g/cm³

MEND-ME

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

PROPIEDADES MECÁNICAS (AITIM, 1997)

DENSIDAD (kg/m³)	420-480
CONTRACCION	Medianamente nerviosa
COEFICIENTE DE CONTRACCION TOTAL (%)	VOLUMETRICA: 14,3
	TANGENCIAL: 7,4
	RADIAL: 2,8
DUREZA	1,2-2,6
FLEXION ESTATICA (N/mm²)	54-76-86,5
MODULO DE ELASTICIDAD (N/mm²)	8.100-9.600
COMPRESION AXIAL (N/mm²)	29,37
COMPRESION PERPENDICULAR (N/mm²)	7,8
CORTANTE (N/mm²)	5-7
FLEXION DINAMICA (J/cm²)	3,8-4,9

MEND-ME

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

5.3 PINUS PINASTER

El *Pinus pinaster*, denominado pino rodeno, pino marítimo, pino rubial o pino negral, es una especie arbórea de la familia de las pináceas que se extiende por España, Portugal, sur de Francia, Italia, Marruecos. Antiguamente era una especie que se utilizaba, en las zonas donde crecía de forma natural, como madera para la construcción.

Actualmente su uso ha ido disminuyendo de forma importante, debido a que, en muchos casos, la madera de las plantaciones existentes no tiene una calidad estructural adecuada y es más productiva para otros usos. Aun así, existen poblaciones naturales que tienen buena calidad de la madera que puede aprovecharse.



Imagen de madera vieja de *Pinus pinaster*. Fte. AIDIMME



Imagen de madera nueva de *Pinus pinaster*. Fte. AIDIMME

MEND-ME

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

5.3.1 FICHA TECNICA

Nombre científico: *Pinus pinaster* Aiton

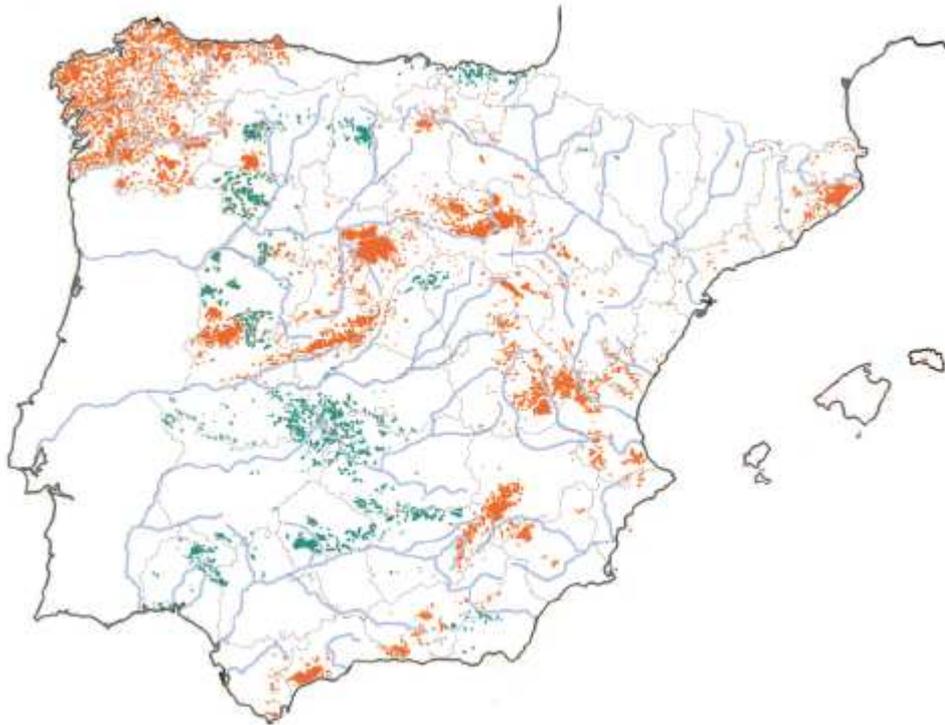
Orden: Coníferas

Familia: Pinaceae

Subfamilia: Pinoideae

Nombre comercial: Pino pinaster, gallego o marítimo

Distribución:



Distribución natural (naranja) y plantaciones (verde) de *Pinus pinaster*. Fte. Compendio de silvicultura. Descripción de los caracteres culturales de las principales especies forestales de España

CARACTERISTICAS MACROSCOPICAS

Madera: Madera con numerosos canales resiníferos que le confiere un color rojizo por estar impregnada de resina. Puede presentar numerosos nudos y además con grandes diámetros.

Madera de albura: el color de la madera de albura es blanco amarillento

Madera de duramen: el color del duramen varía de un color anaranjado a rojo asalmonado.

Anillos de crecimiento: muy diferenciados.

Densidad media al 12% de humedad: 0,530-0,550 g/cm³

MEND-ME

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

PROPIEDADES MECÁNICAS (AITIM, 1997)

DENSIDAD (kg/m³)	475
CONTRACCION	Medianamente nerviosa
COEFICIENTE DE CONTRACCION TOTAL (%)	VOLUMETRICA: 14,5
	TANGENCIAL: 7,6
	RADIAL: 4,1
DUREZA	2,5 semidura
FLEXION ESTATICA (N/mm²)	78
MODULO DE ELASTICIDAD (N/mm²)	7.230
COMPRESION AXIAL (N/mm²)	39,1
COMPRESION PERPENDICULAR (N/mm²)	6,21
CORTANTE (N/mm²)	9
FLEXION DINAMICA (J/cm²)	3

MEND-ME

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

5.4 PINUS HALEPENSIS

Pinus halepensis (pino de Alepo o pino carrasco) es una especie arbórea de la familia de las pináceas. Es un árbol originario de la región mediterránea, tanto norteña como del sur. El nombre científico de la especie proviene del nombre de la ciudad siria de Alepo.

Actualmente su uso como madera estructural prácticamente ha desaparecido, pero antiguamente era muy usada en su región de distribución. Nunca ha sido una especie preciada por su falta de rectitud y por su cantidad de resina. Antiguamente se usaba tanto para construcción como para madera de traviesas. Haciendo una buena labor silvícola puede ser una especie de interés en distintas zonas donde se presenta, tanto en forma de plantaciones como de forma natural.



Imagen de madera antigua de *Pinus halepensis*. Fte. AIDIMME



Imagen de madera nueva de *Pinus halepensis*. Fte. AIDIMME

MEND-ME

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

5.4.1 FICHA TECNICA

Nombre científico: *Pinus halepensis* Mill.

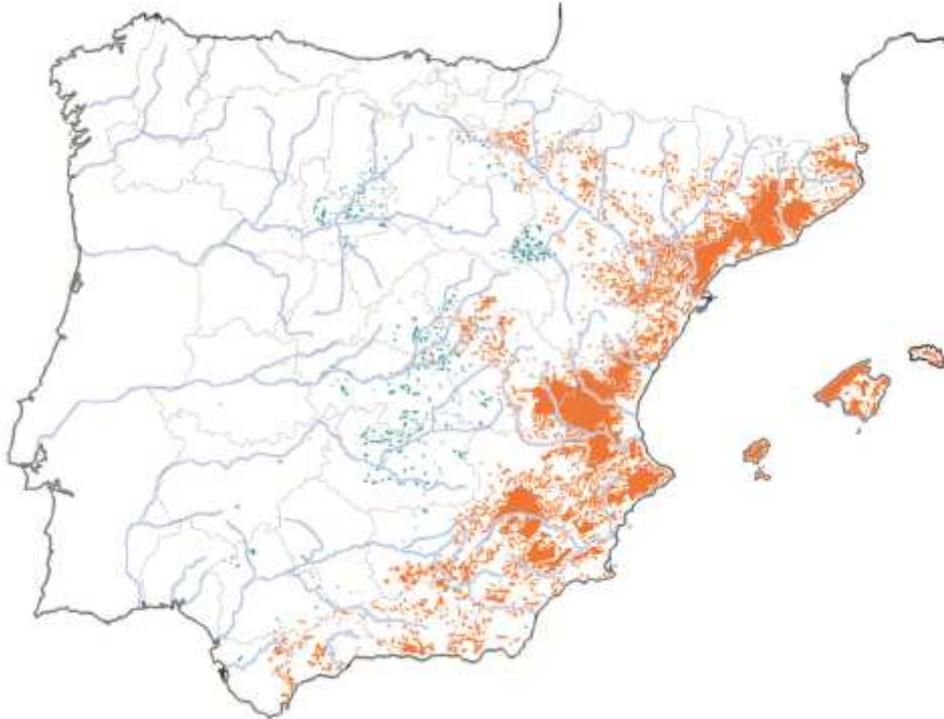
Orden: Coníferas

Familia: Pinaceae

Subfamilia: Pinoideae

Nombre comercial: Pino carrasco

Distribución:



Distribución natural (naranja) y plantaciones (verde) de *Pinus halepensis*. Fte. Compendio de silvicultura. Descripción de los caracteres culturales de las principales especies forestales de España

CARACTERÍSTICAS MACROSCÓPICAS

Madera: madera bastante nudosa y resinosa. De hecho su olor a resina permanece incluso después del secado. El aprovechamiento de la madera es muy limitado debido a que el porte de la madera no es recto por lo que presenta numerosas imperfecciones y defectos.

Madera de albura: madera de albura de color blanco. Se diferencia de la madera de duramen.

Madera de duramen: madera de duramen de color rojizo

Anillos de crecimiento: muy diferenciados y marcados entre la madera de primavera (1) y verano (2)

Densidad media al 12% de humedad: 0,450-0,550 g/cm³

MEND-ME

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

PROPIEDADES MECÁNICAS (AITIM, 1997)

DENSIDAD (kg/m³)	470-600-650
CONTRACCION	Nerviosa
COEFICIENTE DE CONTRACCION TOTAL (%)	VOLUMETRICA: 12-15
	TANGENCIAL: 7,6-10,4
	RADIAL: 4,7-7,7
DUREZA	2,2-3,2 semidura
FLEXION ESTATICA (N/mm²)	88-99
MODULO DE ELASTICIDAD (N/mm²)	10.600-14.500
COMPRESION AXIAL (N/mm²)	45-62
COMPRESION PERPENDICULAR (N/mm²)	10,4
CORTANTE (N/mm²)	8,8-10,9
FLEXION DINAMICA (J/cm²)	5,0-7,5

MEND-ME

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

5.5 MOBILA (o pino amarillo del sur)

La mobila es una denominación, sobre todo de la zona de levante, que comprende los denominado pinos amarillos del sur de américa del norte. Las 4 especies (*Pinus palustris* Mill, *Pinus taeda* L., *Pinus elliottii* Engelm, *Pinus echinata* Mill., de mayor a menor importancia) son difíciles de diferencia incluso al microscopio y eran importadas sin diferenciación desde distintos puertos del golfo de Méjico.

Lo cierto es que esta madera, la “mobila”, se llamaba así porque venía importada desde diferentes puertos del golfo de México, el más común en los inicios de su entrada, del puerto de la bahía de Mobile (de aquí el nombre utilizado), Tampa, Pensacola, etc., en los estados norteamericanos de Luisiana, Florida o Alabama. Estas importaciones comenzaron a finales del siglo XIX (1880) y finalizaron a principios del XX (1930) y solían descargarse en los puertos de Valencia y en menor medida, en el de Mallorca, donde también se la conoce como “Charleston” o “Nort Vell”. A veces también es conocido como pino “melis” o “tea”.

La mobila 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. Microscópicamente, la formación del duramen está muy asociada con la muerte (pérdida del núcleo y del protoplasma) de las células del parénquima.

Esto viene 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; 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,

MEND-ME

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

más porcentaje de albura, y por eso su resistencia mecánica y frente a xilófagos es muy inferior a la de la mobila.

Por ello, debe diferenciarse la mobila que se importa actualmente, proveniente de plantaciones, con unas características bien distintas, de la mobila que fue importada a principios del siglo XX. Por ello, en el mundo de la carpintería se diferencia entre “mobila nueva” o “pino melis”, de menor calidad, y “mobila vieja”. Una de las diferencia es el grosor de los anillos y el color de la madera (pequeños y de color rojizo en la mobila vieja).



Imagen de madera antigua de mobila. Fte. AIDIMME



Imagen de muestras de mobila de distintas épocas: vieja (a la izquierda) y nueva (a la derecha). El espesor de los anillos evidencia el distinto tipo de crecimiento de los árboles de los cuales proceden las muestras. Fte. AIDIMME

MEND-ME

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

5.5.1 FICHA TECNICA

Nombre científico: *Pinus taeda* L.

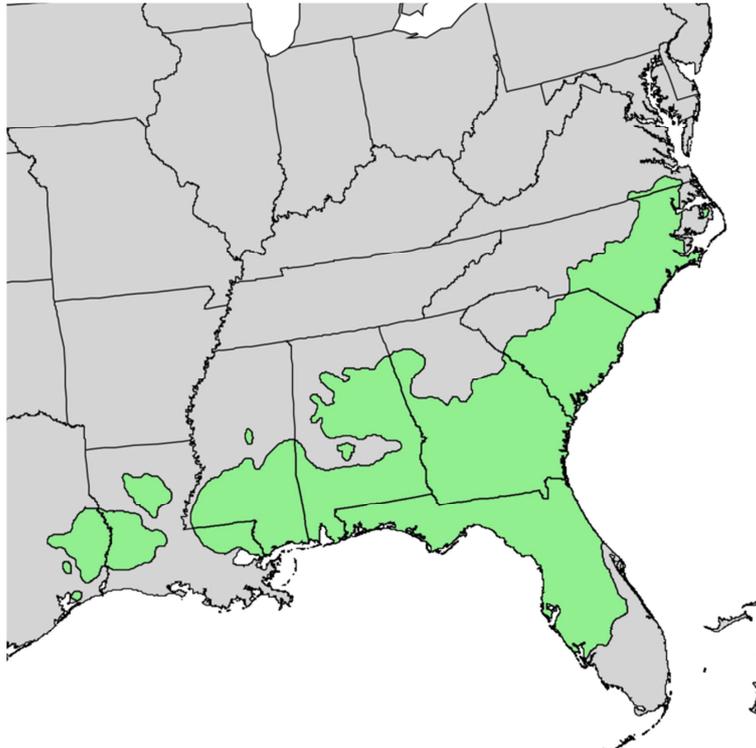
Orden: Coníferas

Familia: Pinaceae

Subfamilia: Pinoideae

Nombre comercial: Pino amarillo del Sur, pino melis o pino mobila

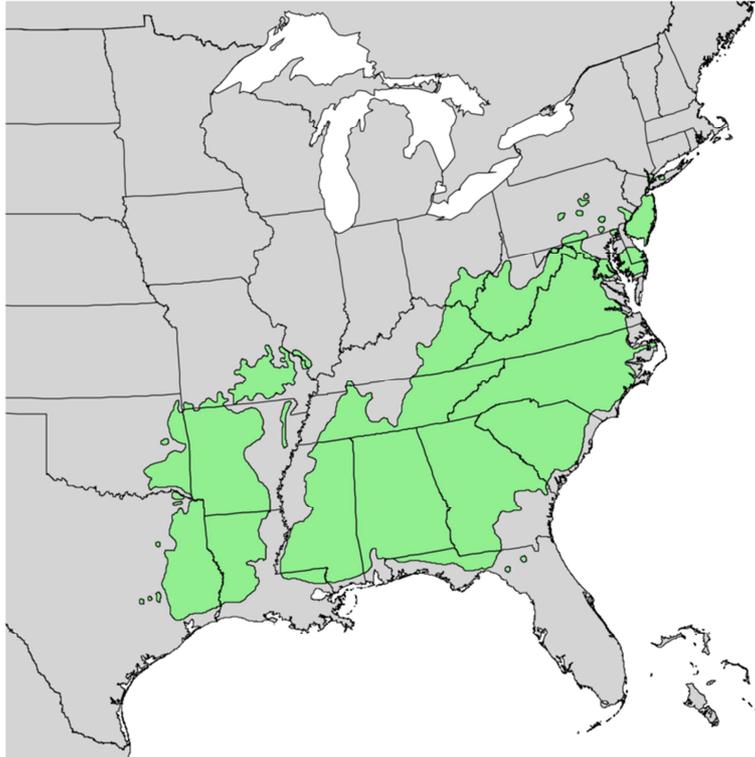
Distribución: especie importada desde EEUU



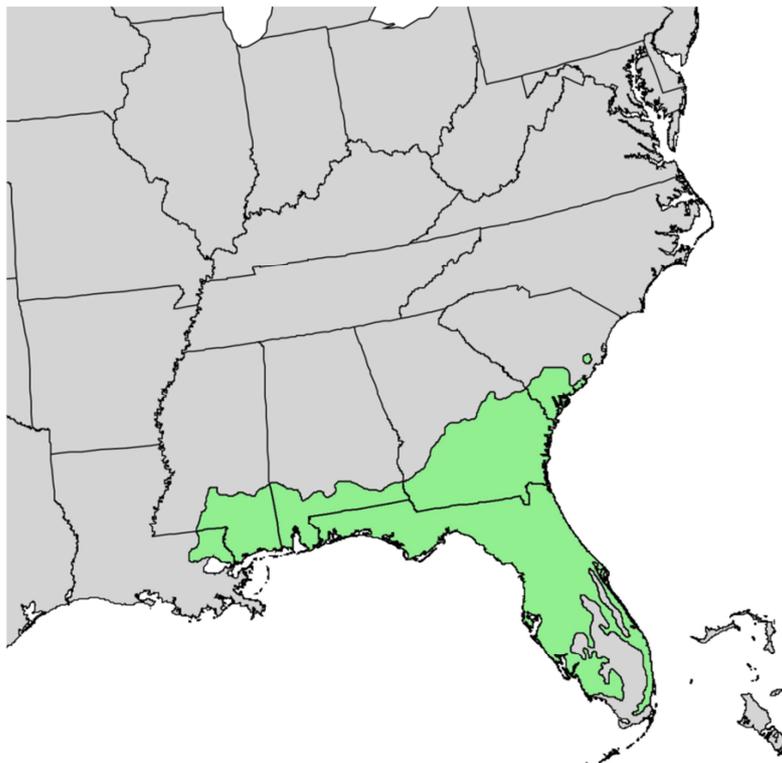
Distribución natural de *Pinus palustris*. Fte. U.S. Department of Agriculture, Forest Service

MEND-ME

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



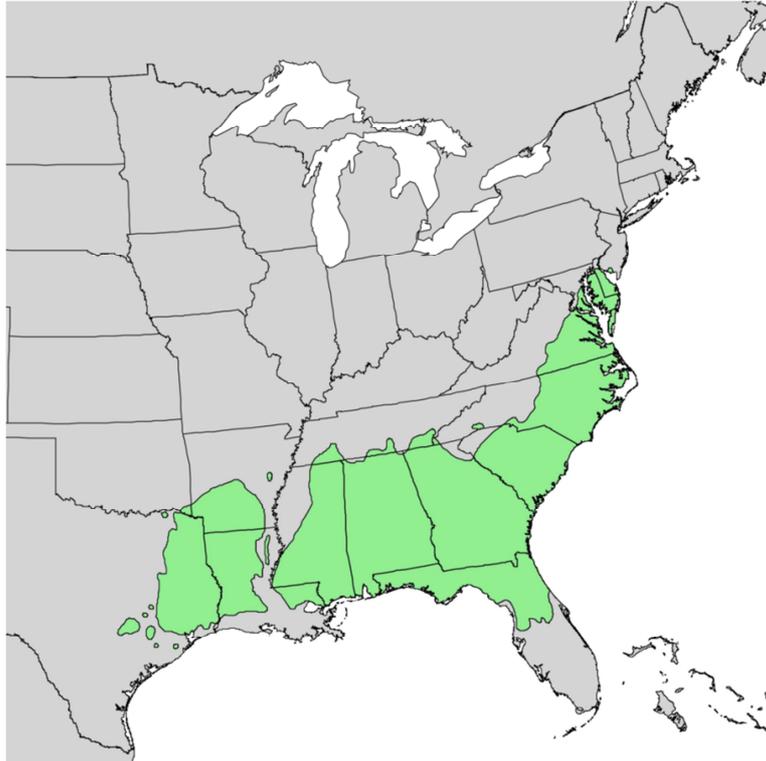
Distribución natural de *Pinus echinata*. Fte. U.S. Department of Agriculture, Forest Service



Distribución natural de *Pinus elliotis*. Fte. U.S. Department of Agriculture, Forest Service

MEND-ME

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



Distribución natural de *Pinus taeda*. Fte. U.S. Department of Agriculture, Forest Service

CARACTERÍSTICAS MACROSCÓPICAS

Madera: poco nudosa y con numerosos canales resiníferos. Tiene un fuerte olor a resina que permanece incluso después de su secado.

Madera de albura: varía de color amarillento a naranja claro.

Madera de duramen: varía color marrón-rojizo a marrón claro.

Anillos de crecimiento: muy diferenciados (1).

Densidad media al 12% de humedad: 0,500 g/cm³

PROPIEDADES MECÁNICAS (AITIM, 1997)

DENSIDAD (kg/m³)	400-500
CONTRACCION	Medianamente nerviosa
COEFICIENTE DE CONTRACCION TOTAL (%)	VOLUMETRICA: 12
	TANGENCIAL: 7,4-7,7
	RADIAL: 4,6-5,1
DUREZA	Semidura

MEND-ME

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

FLEXION ESTATICA (N/mm²)	74-105
MODULO DE ELASTICIDAD (N/mm²)	11.100-14.500
COMPRESION AXIAL (N/mm²)	41-58
COMPRESION PERPENDICULAR (N/mm²)	2,7-3,3
CORTANTE (N/mm²)	7-12,5
FLEXION DINAMICA (J/cm²)	6-7

MEND-ME

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

5.6 POPULUS NIGRA

El álamo negro o chopo negro (*Populus nigra*), también conocido como chopera y/o alameda, es una especie de árbol perteneciente a la familia de las salicáceas común en España.

Su uso en construcción se remonta a hace varias décadas, cuando lo chopos no se cultivaban o plantaban y se podía obtener madera de mediana calidad. Actualmente la plantación de clones, que priorizan el crecimiento para chapa y no la calidad de la madera, ha dado lugar a que la madera maciza de chopo tenga una calidad baja. En cambio, se encuentra madera en forma de rollizo (esta especie se usaba sin aserrar) en buen estado de conservación en muchas construcciones antiguas.



Imagen de madera antigua de *Populus nigra*. Fte. AIDIMME

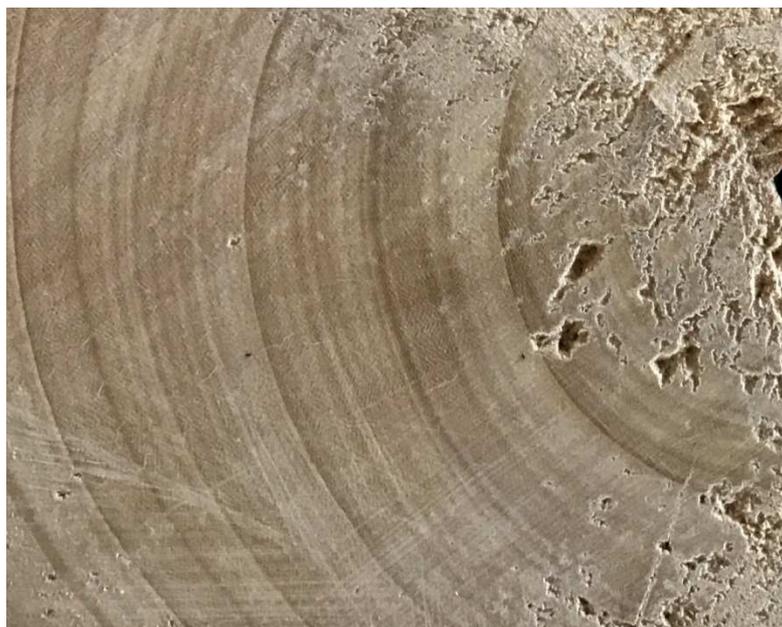


Imagen macroscópica de los anillos de madera antigua de *Populus nigra*. Fte. AIDIMME

MEND-ME

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

5.6.1 FICHA TECNICA

Nombre científico: *Populus nigra* L.

Orden: Malpighiales

Familia: Salicaceae

Nombre comercial: Chopo negro



Distribución de *Populus nigra*. Fte. Compendio de silvicultura. Descripción de los caracteres culturales de las principales especies forestales de España

CARACTERISTICAS MACROSCOPICAS

Madera: color de la madera amarillo pálido o blanco amarillo, aunque esta tonalidad puede variar

Madera de albura: la madera de albura no se distingue de la del duramen

Madera de duramen: la madera de duramen no se distingue de la de albura

Anillos de crecimiento: son visibles

Densidad media al 12% de humedad: 0, 480 g/cm³

MEND-ME

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

PROPIEDADES MECÁNICAS (AITIM, 1997)

DENSIDAD (kg/m³)	420-440-480
CONTRACCION	Medianamente nerviosa
COEFICIENTE DE CONTRACCION TOTAL (%)	VOLUMETRICA: 14,3
	TANGENCIAL: 7,4
	RADIAL: 2,8
DUREZA	1,2-2,6 blanda
FLEXION ESTATICA (N/mm²)	54-76-86,5
MODULO DE ELASTICIDAD (N/mm²)	8.100-9.600
COMPRESION AXIAL (N/mm²)	29,37
COMPRESION PERPENDICULAR (N/mm²)	7,8
CORTANTE (N/mm²)	5-7
FLEXION DINAMICA (J/cm²)	3,8-4,9

MEND-ME

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

5.7 PINUS RADIATA

El pino insigne, pino de Monterrey o pino de California (*Pinus radiata*) es una especie arbórea perteneciente a la familia de las pináceas, originaria del suroeste de los Estados Unidos, principalmente California.

Actualmente es una especie que está cobrando importancia en construcción debido a la calidad de la madera de las plantaciones realizadas desde hace décadas en el norte de la península. Antiguamente no se usaba al no importarse desde su país de origen.



Imagen de madera nueva de *Pinus radiata*. Fte. AIDIMME

5.7.1 FICHA TECNICA

Nombre científico: *Pinus radiata* D. Don

Orden: Coníferas

Familia: Pinaceae

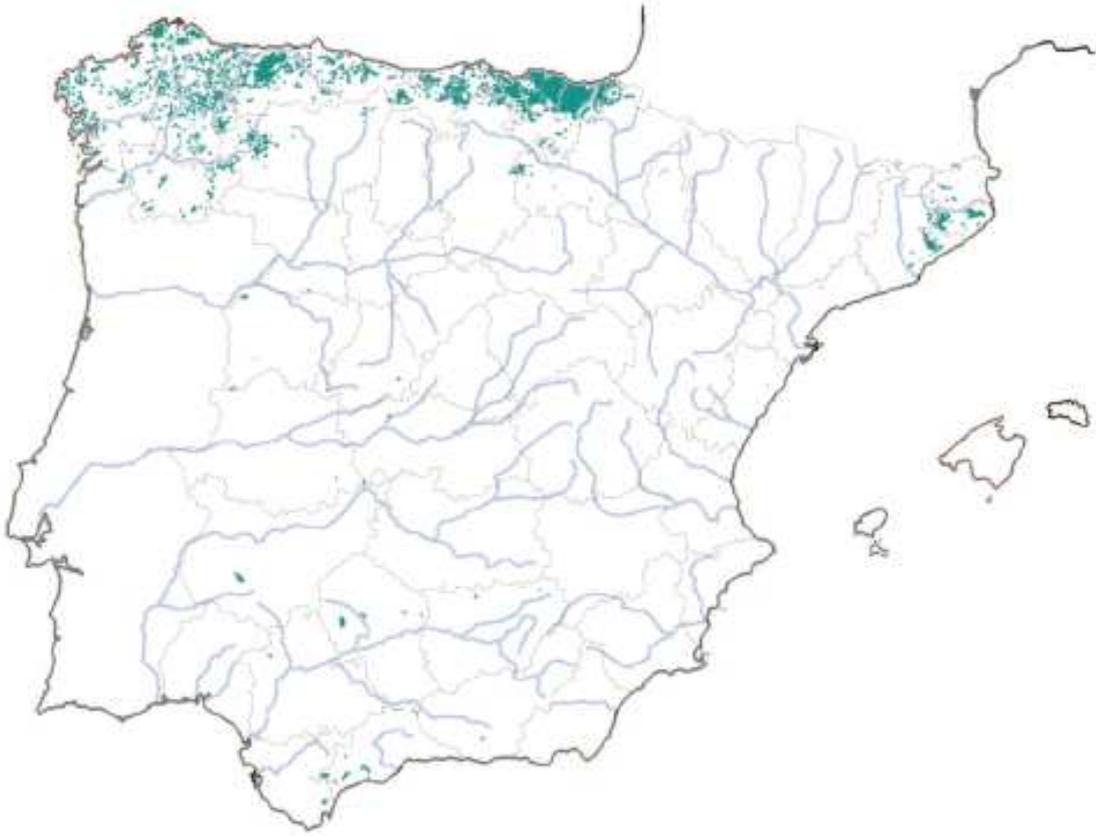
Subfamilia: Pinoideae

Nombre comercial: Pino insigne

Distribución:

MEND-ME

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



Distribución de las plantaciones de *Pinus radiata* Fte. Compendio de silvicultura. Descripción de los caracteres culturales de las principales especies forestales de España

CARACTERÍSTICAS MACROSCÓPICAS

Madera de albura: La madera de albura es de color blanco amarillento, que se oscurece con la luz.

Madera de duramen: El duramen tiene un color marrón amarillento o marrón. Es una madera resinosa.

Anillos de crecimiento: Diferenciados. Son visibles y tienen un gran espesor, de 1 a 5 por cm. La transición de la madera de primavera a la de verano es progresiva (1). La madera de verano es gruesa (2).

Densidad media al 12% de humedad: 0,500 g/cm³

MEND-ME

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

PROPIEDADES MECÁNICAS (AITIM, 1997)

DENSIDAD (kg/m³)	500
CONTRACCION	Medianamente nerviosa
COEFICIENTE DE CONTRACCION TOTAL (%)	VOLUMETRICA: 14,5
	TANGENCIAL: 7,4
	RADIAL: 4,2
DUREZA	1,8 semidura
FLEXION ESTATICA (N/mm²)	83-85
MODULO DE ELASTICIDAD (N/mm²)	8.630-8.800
COMPRESION AXIAL (N/mm²)	40-42
COMPRESION PERPENDICULAR (N/mm²)	5,7-6,2
CORTANTE (N/mm²)	10-10,9
FLEXION DINAMICA (J/cm²)	3,6-3,7

MEND-ME

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

5.8 PICEA ABIES

La *Picea abies* denominada píceas común, píceas de Noruega o píceas europea, es una conífera de la familia de las pináceas. Es, seguramente la especie mayormente usada en construcción antiguamente y actualmente en toda Europa junto con el pino rojo (*Pinus sylvestris*).

Encontramos que actualmente es la especie que mayor comercio tiene y que con mayor frecuencia se usa en España tanto en forma de madera maciza como laminada. Pero hemos visto que antiguamente también se usaba en algunas construcciones sobre todo antes de la guerra civil, cuando se importaba madera tanto de Europa como de estados unidos.



Imagen de madera antigua de *Picea abies*. Fte. AIDIMME



Imagen de madera laminada nueva de *Picea abies*. Fte. AIDIMME

MEND-ME

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

5.8.1 FICHA TECNICA

Nombre científico: *Picea abies* (L.) H. Karst

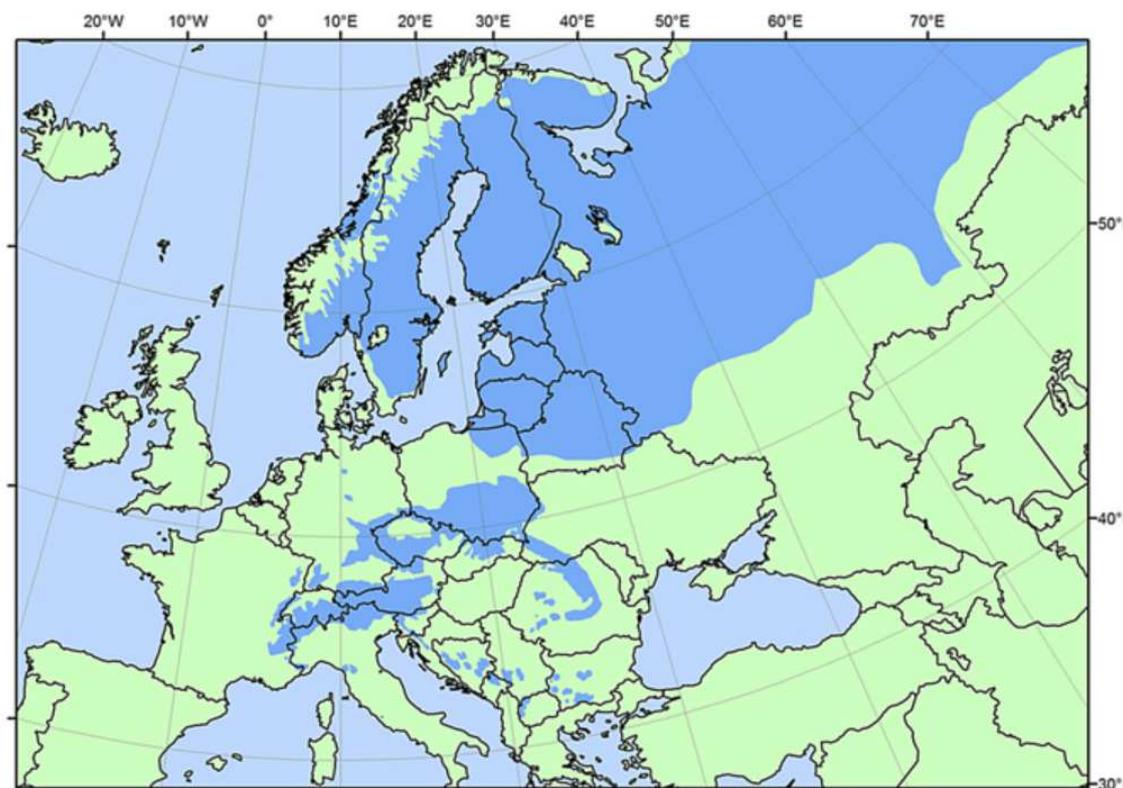
Orden: Conífera

Familia: Pinaceae

Subfamilia: Piceoideae

Nombre comercial: Abeto rojo

Distribución: Habitual en Europa central y septentrional, desde los Alpes hasta el oeste de Rusia, donde es muy común. En España se cultiva con frecuencia como ornamental y para su venta como árbol de Navidad, ya que se prefiere a los pinos y a otros abetos. También se puede encontrar en los montes en antiguas parcelas forestales en el norte de España.



Distribución de *Picea abies* Fte. EUFORGEN 2009 (www.euforgen.org)

CARACTERÍSTICAS MACROSCÓPICAS

Madera: El color de la madera varía del blanco amarillento a amarillo rojizo. La madera de albura no se diferencia de la de duramen. Los radios leñosos son poco visibles aunque en los cortes radiales aparecen como un fino mallado.

Anillos de crecimiento: son visibles y muy diferenciados (1)

Densidad media al 12% de humedad: 0,465 g/cm³

MEND-ME

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

PROPIEDADES MECÁNICAS (AITIM, 1997)

DENSIDAD (kg/m³)	440-460-470
CONTRACCION	Medianamente nerviosa
COEFICIENTE DE CONTRACCION TOTAL (%)	VOLUMETRICA: 13-14
	TANGENCIAL: 9
	RADIAL: 4-4,5
DUREZA	1,2-1,6 semidura
FLEXION ESTATICA (N/mm²)	65-77
MODULO DE ELASTICIDAD (N/mm²)	10.000-12.000
COMPRESION AXIAL (N/mm²)	40-50
COMPRESION PERPENDICULAR (N/mm²)	sd
CORTANTE (N/mm²)	5-7,5
FLEXION DINAMICA (J/cm²)	4-5

MEND-ME

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

6 RESULTADO TÉCNICO 2: ESPECIES DE MADERA Y DURABILIDAD NATURAL FRENTE A HONGOS E INSECTOS XILÓFAGOS

6.1 DURABILIDAD NATURAL

La durabilidad de las especies de madera a los diferentes tipos de organismos se ensaya mediante métodos que siguen normas europeas específicas. La variabilidad en cuanto a la durabilidad que se puede encontrar en una misma especie se tiene en cuenta ensayando numerosas réplicas de una misma especie. Sin embargo, también hay que tener en cuenta que no se pueden permitir resultados altamente variables dentro de una misma especie, por lo que se suelen comparar con especies de referencia y se dan datos relativos y no absolutos.

Basados en los resultados de los ensayos, la durabilidad natural de las especies de madera se clasifica en:

- Una escala de cinco grados frente al ataque por hongos
- Una escala de dos grados frente a coleópteros que degradan la madera
- Una escala de tres grados frente a termitas y organismos marinos

Respecto a los hongos se relacionan dos clasificaciones de durabilidad que se designan como X e (Y). La primera se deriva normalmente de los resultados de los ensayos de laboratorio o de campo simulando situaciones de contacto con el suelo. La segunda se basa en resultados de ensayos de laboratorio orientados a la determinación de la resistencia frente a los hongos basidiomicetos xilófagos.

La tabla siguiente recoge las especificaciones de cada una de las especies de madera contempladas en la presente memoria.

Especie	Hongos	<i>Hylotrupes</i>	<i>Anobium</i>	Termitas	Xilófagos marinos
<i>Pinus halepensis</i>	MD*	D	D	S	No R
<i>Mobila</i>	3	D	D	S	No R
<i>Populus nigra</i>	5 (5) Tendencia al azulado	-	S	S	No R
<i>Pinus nigra</i>	4 v (3)	D	D	S	No R
<i>Pinus sylvestris</i>	3-4 (2-5)	D	D	S	
<i>Pinus pinaster</i>	3-4 (2-5)	D	D	S	No R
<i>Pinus radiata</i>	4-5	D	D	S	No R
<i>Picea abies</i>	4 (4-5)	S	S	S	No R

*Del libro *Especies de madera (AITIM)*

D: durable

S: susceptible

MD: medianamente durable

No R: no resistente

v: resultados variables

MEND-ME

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

Clase de durabilidad de la madera frente a los hongos xilófagos según EN 350-01

Clases de durabilidad	Descripción
1	Muy durable
2	Durable
3	Medianamente durable
4	Poco durable
5	No durable

6.2 EJEMPLOS DE DURABILIDAD NATURAL

Algunos ejemplos de la durabilidad de las distintas especies y de la presencia o ausencia de duramen se observan en las siguientes imágenes.



Muestra de *Pinus sylvestris* atacada por carcoma fina en la albura. Fte. AIDIMME

MEND-ME

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



Degradación por carcoma gruesa en *Pinus halepensis*. Fte. AIDIMME



Degradación por carcoma gruesa y fina en *Pinus nigra*, fundamentalmente en la albura. Fte. AIDIMME

MEND-ME

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



Degradación por termitas (*Reticulitermes lucifugus*) en abeto (*Picea abies*). Nótese el típico daño en forma de “hoja de libro”: las termitas abren galerías paralelas a la dirección de la fibra de la madera, entre las cuales van dejado intactas tiras delgadas, que no tienen resistencia apreciable. Fte. AIDIMME



Degradación por termitas, hongos y carcoma en una vigueta de *Pinus nigra*. Fte. AIDIMME

MEND-ME

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



Degradación por hongos en madera de mobila por exceso de humedad prolongado (10-11 meses). Fte. AIDIMME

MEND-ME

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

7 RESULTADO TÉCNICO 3: USO DE LA MADERA EN CONSTRUCCIÓN Y REHABILITACIÓN

7.1 INTRODUCCIÓN: USO DE LA MADERA EN EL PASADO

Se analiza la presencia en edificaciones antiguas desde hace siglos. En muchos edificios, en las obras de rehabilitación la madera ha pasado a ser un elemento prácticamente patrimonial que se desea mantener.

En España existen numerosas especies utilizadas para madera en construcción. Entre ellas destacan los pinos, roble, castaño, chopo, etc. El roble y el castaño casi se usan solamente en el norte, donde de forma natural abundan en los bosques.

La investigación de AIDIMME se centra sobre todo en la madera estructural de mayor presencia en la Comunitat Valenciana, para la cual se han visitado numerosos inmuebles. Como se ha expuesto en los apartados anteriores, en la Comunitat predominan los pinos y otras coníferas como el abeto, y en menor medida el chopo. Otras especies de pequeñas dimensiones se usaban antiguamente: la encina, el almendro, el cerezo, el olmo e incluso el olivo.

El uso de estas especies ha ido evolucionando a lo largo del tiempo. En la actualidad aún perviven elementos estructurales bastante antiguos, que constituyen distintos tipos estructurales, típicos de cada época.

Por ello, se han diferenciado distintas épocas en las que el uso de las distintas especies de madera era característico. A grandes rasgos se ha decidido diferenciar la madera antigua anterior a la existencia de sierras mecánicas y la madera de sierra. Las sierras mecánicas empezaron funcionar en España a finales del siglo XIX, como en el aserradero de Valsaín donde se aserraba *Pinus sylvestris*.

También se ha decidido diferenciar la época de importación de madera de finales del siglo XIX y principios, antes de la Guerra Civil. Toda esta madera se aserraba en países de América y Europa, y sobre todo era madera de mobla y abeto.

MEND-ME

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

7.2 MADERA ESTRUCTURAL ENTRE LOS SIGLOS XV Y FINALES DEL SIGLO XIX

Tipología de cubiertas

Con tablero estructural de madera



Corrala en Aranjuez. Fte. AIDIMME



Cubierta en el palacio de la carta en Tenerife. Fte. AIDIMME

MEND-ME

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

Sin tablero de madera



Museo de Bellas Artes de Valencia. Fte. AIDIMME



Palacio de la Justicia de Valencia. Fte. AIDIMME

MEND-ME

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



Claustro de San Vicente de la Roqueta de Valencia. Fte. AIDIMME

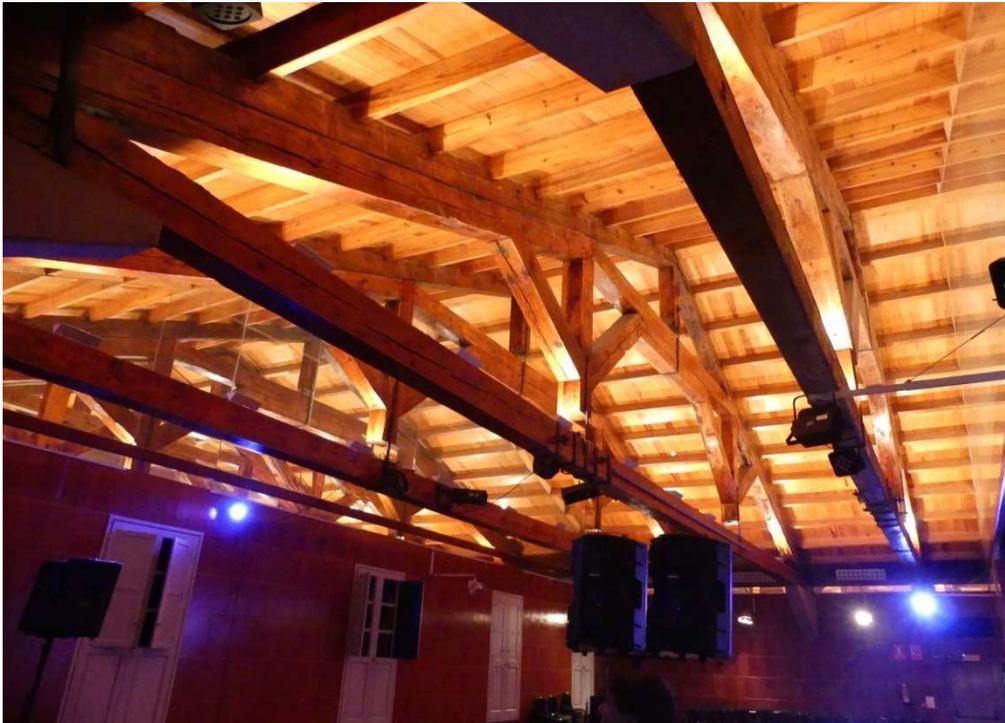


Convento Mosén Sorell. Fte. AIDIMME

MEND-ME

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

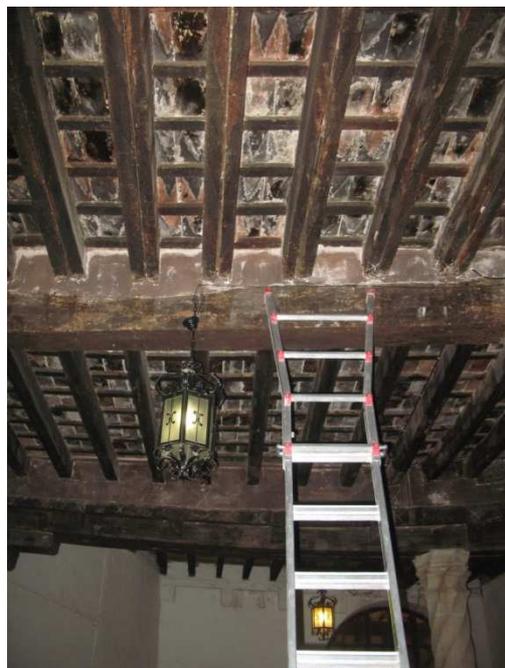
Estructuras cerchadas de madera sin elementos metálicos



Cerchas de madera con uniones metálicas en el Teatro Guimerá de Santa Cruz de Tenerife. Fte. AIDIMME

Tipología de forjados

Con tablero estructural de madera



Castillo de Benissanó. Fte. AIDIMME

MEND-ME

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



Palau Ducal de Gandia. Fte. AIDIMME

Con revoltón



Palacio de la Justicia de Valencia. Fte. AIDIMME

MEND-ME

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



Palacio de Valeriola (Valencia). Fte. AIDIMME



Palacio de Valeriola (Valencia). Fte. AIDIMME

MEND-ME

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

Estructura de mampuesto



Forjado de mampuesto y madera en Aranjuez. Fte. AIDIMME



Forjado de mampuesto y madera en Madrid. Fte. AIDIMME

MEND-ME

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

7.3 MADERA ESTRUCTURAL ENTRE FINALES DEL SIGLO XIX Y LA GUERRA CIVIL

Madera estructural importada

Casi toda la madera importada se centraba en especies como la mobila y el abeto, que fueron importadas durante los años comprendidos aprox. entre 1890 y 1930.



Estructura cerchada de cubierta hecha de mobila. Fte. AIDIMME



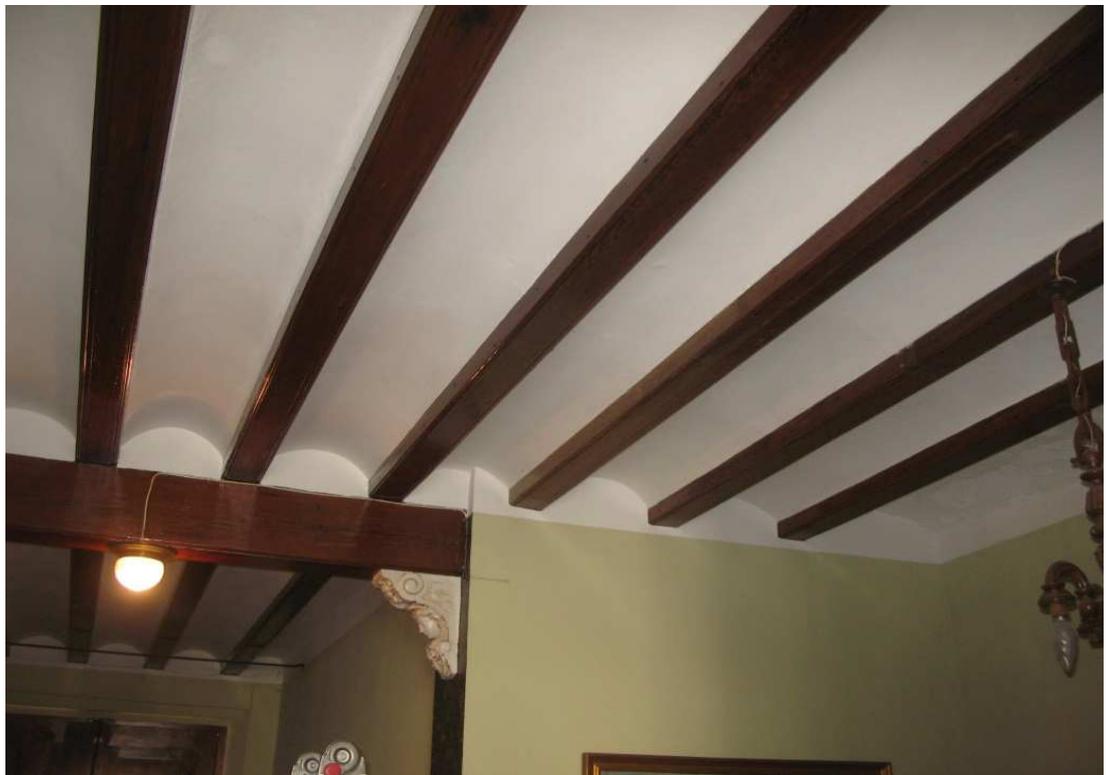
Estructura cerchada de cubierta hecha de pares de mobila y los tirantes metálicos. Las correas son de madera de abeto. Fte. AIDIMME

MEND-ME

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



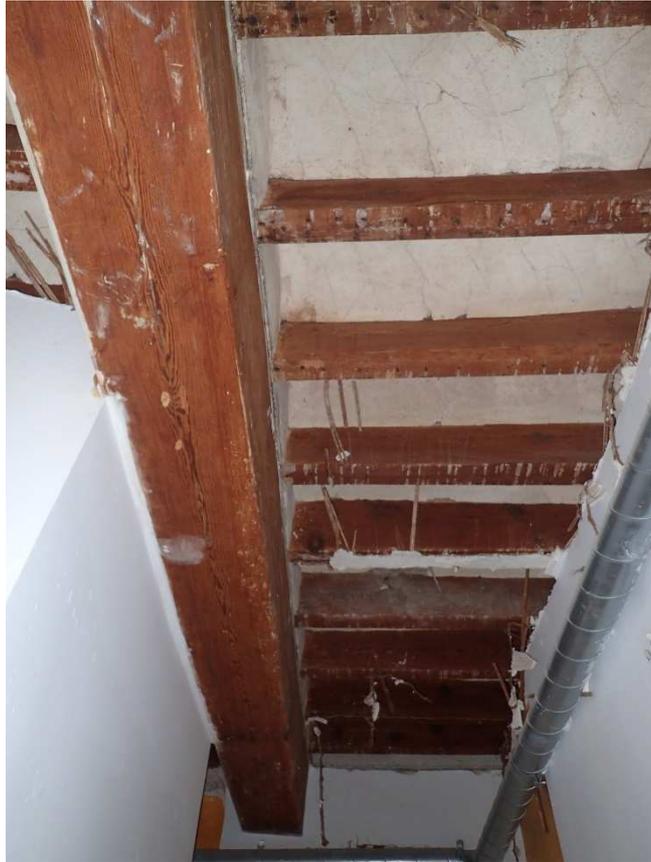
Estructura de forjado típico de mobila de las casas de principio de siglo XX en Massanassa. Fte. AIDIMME



Estructura de forjado típico de mobila de las casas de principio de siglo XX en Alboraya. Fte. AIDIMME

MEND-ME

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



Estructura de forjado combinado de vigas de carga de mobila y viguetas de abeto en Alicante. Fte. AIDIMME



Estructura de cubierta combinado de vigas de carga de mobila y viguetas de abeto en Alcudia. Fte. AIDIMME

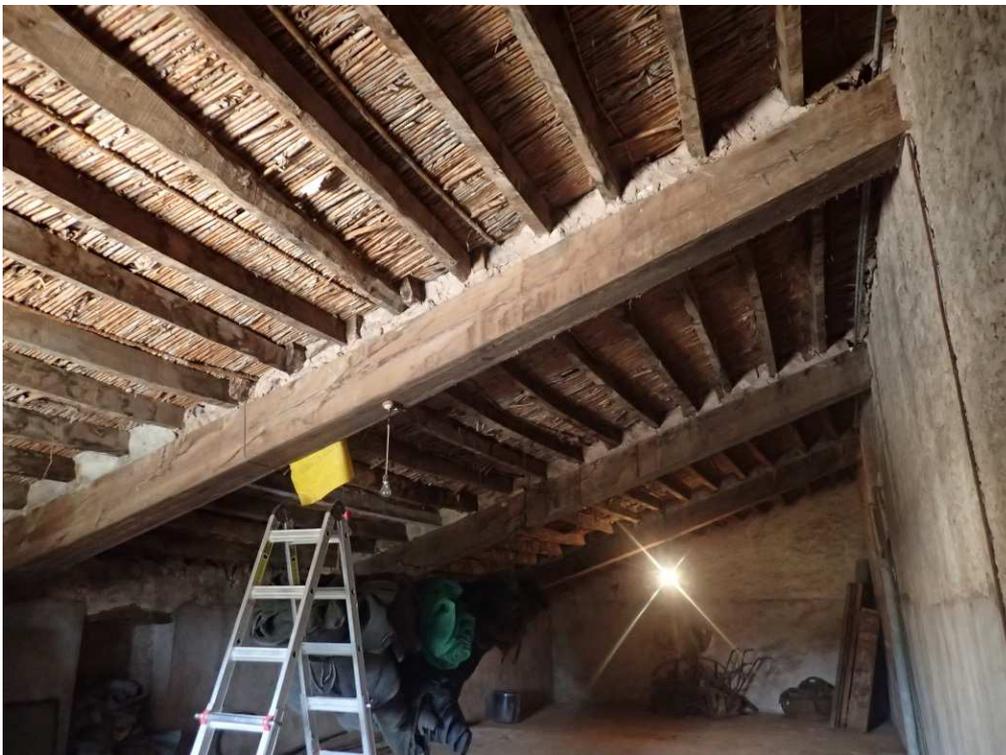
MEND-ME

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

Madera de origen local



Estructura cerchada de cubierta hecha de madera de pinos locales (*Pinus halepensis* y *P. pinaster*). Fte. AIDIMME



Estructura de cubierta hecha vigas de carga de mobila junto con correas de madera de pinos locales (*Pinus halepensis* y *P. pinaster*). Fte. AIDIMME

MEND-ME

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



Estructura de cubierta de madera de pinos locales (*Pinus halepensis* y *P. pinaster*). Fte. AIDIMME



Estructura de cubierta de madera de vigas de carga de chopo y vigas de pinos locales (*Pinus halepensis*). Fte. AIDIMME

MEND-ME

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

7.4 MADERA ESTRUCTURAL DESDE LA GUERRA CIVIL

Desde la Guerra Civil, el uso de la madera estructural en España es bastante menor que en épocas anteriores, aunque en los últimos años se empieza a trabajar otra vez con la madera, sobre todo en rehabilitación. Se usan a menudo materiales derivados de la madera como madera laminada encolada, madera microlaminada y tableros de partículas y de fibras. Las normativas y directivas europeas favorecen el uso de la madera en construcción, por sus características de material renovable, reciclable y su buen aislamiento térmico.

El estancamiento de la obra nueva ha dado lugar a intervenir en edificios antiguos, donde la presencia de madera es importante, sobre todo en forjados y cubiertas.

Parte de la madera suele encontrarse en buenas condiciones y la eliminación por completo de las estructuras a veces supone un problema y, a su vez, una pérdida del patrimonio y encanto del edificio. Por ello, se plantea la recuperación de estas estructuras al igual que ocurre con los edificios protegidos.

En los edificios patrimoniales o protegidos, la madera se ha conservado casi por completo, como se ha visto en el apartado anterior, y prácticamente goza de la misma protección que todo el edificio, aunque en algunos casos se encuentre en mal estado.

MEND-ME

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

8 RESULTADO TÉCNICO 4: TÉCNICAS DE EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVA DE LA MADERA

8.1 INTRODUCCIÓN

En el caso de la madera, la tabla siguiente muestra las técnicas de evaluación no destructiva de mayor interés.

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 (ϵ'), la pérdida dieléctrica (ϵ''), 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
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

MEND-ME

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

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

Tabla de las principales técnicas no destructivas aplicables a madera.

A continuación se muestran unas fichas resumen de las principales técnicas de evaluación no destructiva de la madera estructural.

MEND-ME

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

8.2 TÉCNICA 1: GEORRADAR

TÉCNICA:	GEORRADAR
<p>Definición</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: http://www.orcromindustrial.com/</i></p> <p>En la madera, el georradar detecta cavidades internas, y permite establecer su posición y tamaño.</p>
<p>Resultados que proporciona</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>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. • Muestra la distribución de humedades de un elemento. • 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.
<p>Desventajas y limitaciones</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Se necesita personal especializado para la interpretación de los radargrama. • No existe un procedimiento para establecer una equivalencia entre los

MEND-ME

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

	<p>tamaños de las anomalías detectadas en los radargramas y la reducción de resistencia mecánica de la madera que conlleva la existencia de aquéllas.</p> <ul style="list-style-type: none"> • 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. • 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. • 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. • Las maderas de menor densidad (por ejemplo, chopo o paulownia) tienen propiedades dieléctricas menores, lo que hace más difícil detectar defectos en los radargramas. • 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. • 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). • No existes georradares específicos para madera o que estén configurados previamente para ésta. • 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. • 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).
--	--

MEND-ME

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

8.3 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> <div data-bbox="523 943 1295 1514" 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>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.

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"> • Requiere baja potencia.
<p>Desventajas y limitaciones</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 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. • 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. • 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. • En los aserraderos, debido a las velocidades altas de inspección en línea, las vibraciones mecánicas de los troncos o los tablonos perturban la medida de la polarización de la onda de microondas, lo que ocasiona una pérdida significativa de resolución en cuanto a los defectos. • Aunque las potencias de trabajo son bajas, por seguridad no es conveniente radiar microondas sin protección. • Se requiere mucha más investigación y pruebas en el campo de la madera. • 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. • 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).

MEND-ME

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

8.4 TÉCNICA 3: RESISTOGRAFÍA

TÉCNICA:	RESISTOGRAFÍA
<p>Definición</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> <div style="text-align: center;"> <p>Resistógrafo IML-RESI PD400</p>  <p>Instrumento de perforación. 1: asideros; 2: unidad digital de registro de datos; 3: aguja perforadora. Fuente: AIDIMME</p> </div> <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>Resultados que proporciona</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>Ventajas</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Permite el acceso a elementos que no son visibles y de difícil acceso como empotramientos de vigas o viguetas en muros y muretes. • 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. • Permite conocer el estado de la muestra a la vez que se realiza la inspección (en dispositivos con muestra de grafica en pantalla digital). • Hace posible diferenciar claramente la madera que presenta un ataque por hongos de la afectada por un ataque de insectos. • 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. • 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. • 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. • 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.
<p>Desventajas y limitaciones</p>	<ul style="list-style-type: none"> • No proporciona directamente perfiles de densidad de la madera, si bien los perfiles resistográficos obtenidos son muy aproximadamente proporcionales a la densidad. • Algunas especies de madera tienen de forman natural, por su baja densidad, bajos valores de resistencia a la penetración, pero ello no constituye un síntoma de degradación. • 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. • 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.

MEND-ME

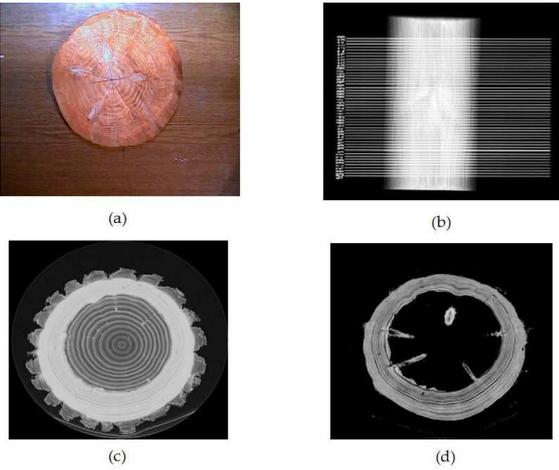
Desarrollo de una metodología para la evaluación no destructiva de madera estructural y aplicación innovadora a rehabilitación

8.5 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>CT Log precisely detects</p> <ul style="list-style-type: none"> × Pith × Sound knots × Dead knots × Splits × Resin pockets × Heavy rot × Slope of grain × Metals × Stones × Ceramics × Heartwood × Green density × Annual rings spacing × Compression wood × Bark enclosures × Under bark shape × Wood species
	<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></p> <p><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>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).

MEND-ME

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

8.6 TÉCNICA 5: ULTRASONIDOS

TÉCNICA:	ULTRASONIDOS
<p>Definición</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>Resultados que proporciona</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>Ventajas</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Permite determinar el módulo de elasticidad, la resistencia a flexión y, por tanto, la clase resistente de la madera según el CTE. • El tiempo de toma de la medida es breve. • Los equipos comerciales son robustos, lo que permite su uso en obra. • Está firmemente asentado en la industria. • 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.
<p>Desventajas y limitaciones</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 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. • 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. • En entornos donde hay muchas vibraciones (por excavaciones, equipos electrógenos, perforadoras, etc.), los resultados son incorrectos o el equipo no responde apropiadamente. • 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. • 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.

MEND-ME

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

8.7 TÉCNICA 6: VIBRACIONES INDUCIDAS/ONDAS DE PRESIÓN

TÉCNICA:	VIBRACIONES INDUCIDAS/ONDAS DE PRESIÓN
<p>Definición</p>	<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>
<p>Resultados que</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</p>

MEND-ME

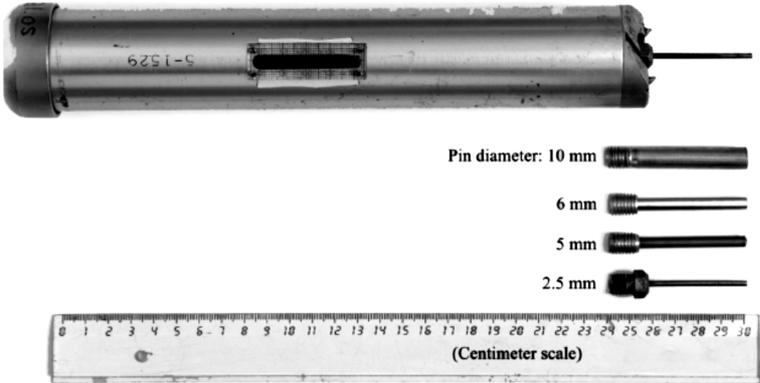
Desarrollo de una metodología para la evaluación no destructiva de madera estructural y aplicación innovadora a rehabilitación

<p>proporciona</p>	<p>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>Ventajas</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Permite determinar el módulo de elasticidad, la resistencia a flexión y, por tanto, la clase resistente de la madera según el CTE. • El tiempo de toma de la medida es muy breve. • 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.
<p>Desventajas y limitaciones</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 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. • 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. • 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. • 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. • En entornos donde hay muchas vibraciones (por excavaciones, equipos electrógenos, perforadoras, etc.), los resultados son incorrectos o el equipo no responde apropiadamente.

MEND-ME

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

8.8 TÉCNICA 7: PENETROMETRÍA

TÉCNICA:	PENETROMETRÍA
<p>Definición</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>Resultados que proporciona</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>
<p>Ventajas</p>	<ul style="list-style-type: none"> Se puede determinar la densidad de la madera de forma rápida y no destructiva

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"> • Es un instrumento ligero, fácilmente transportable, y de fácil uso, pudiendo evaluar los árboles en pie o en servicio. • 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. • Es más cómodo de usar que los equipos de ultrasonidos y de resistografía.
<p>Desventajas y limitaciones</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 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. • Su uso se limita a valorar el estado superficial de la pieza, hasta 40 mm de profundidad. • 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). • Muchos autores recomiendan usarlo en combinación con otras técnicas no destructivas como resistografías o ultrasonidos, a fin de contrastar y mejorar resultados. • Es conveniente tener en cuenta la dirección en la que se está introduciendo la varilla, puesto que pueden variar los resultados. • 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.

MEND-ME

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

8.9 TÉCNICA 8: EXTRACCIÓN DE TORNILLOS

TÉCNICA:	EXTRACCIÓN DE TORNILLOS
<p>Definición</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>Resultados que proporciona</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>Ventajas</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Es una técnica de fácil implantación en obra y rápido uso. • El equipamiento es ligero. • Permite predecir la existencia de daños bióticos en la madera puesta en obra, pues detecta diferencias en la resistencia a la extracción

MEND-ME

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

	<p>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.</p> <ul style="list-style-type: none"> • 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%. • 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.
<p>Desventajas y limitaciones</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 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). • Se usa poco en España. • 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. • 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.

MEND-ME

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

8.10 TÉCNICA 9: TERMOGRAFÍA DE INFRARROJOS

TÉCNICA:	TERMOGRAFÍA DE INFRARROJOS
<p>Definición</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="754 869 1067 1303" data-label="Image"> </div> <p style="text-align: center;"><i>Cámara de Infrarrojos E6 con MSX. Fuente: FLIR Systems.</i></p> <div data-bbox="486 1391 1342 1659" data-label="Image"> </div> <p style="text-align: center;"><i>Imagen termográfica de un techo de madera con filtración de agua. Fuente: TRATECVAL.</i></p>
<p>Resultados que proporciona</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 degradaciones no superficiales, dependiendo de su tamaño y profundidad. En este</p>

MEND-ME

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

	<p>sentido, en las variaciones de contenido de humedad, puede detectarse el tamaño y profundidad de los defectos detectables con esta técnica.</p>
<p>Ventajas</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Permite inspeccionar en una sola medición superficies amplias incluso en zonas de difícil accesibilidad. • Los termogramas se obtienen muy rápidamente. • 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.
<p>Desventajas y limitaciones</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Se usa poco debido al elevado precio de los equipos de termografía infrarroja. • 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. • No existe mucha experiencia documentada para usos <i>in situ</i>. • La técnica es de fácil aplicación, pero se necesita personal experimentado para interpretar los termogramas. • 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. • 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). • No proporciona, directa o indirectamente, el módulo de elasticidad ni la resistencia a flexión. Por tanto, no permite clasificar la madera según el CTE.

MEND-ME

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

9 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 primera anualidad del proyecto (enero 2017-mayo 2018).



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