

INFORME PROYECTOS— 2025

**EVALUACIÓN, MONITORIZACIÓN Y REHABILITACIÓN INTELIGENTE DE FORJADOS
HISTÓRICOS CON VIGUETAS DE MADERA**

“EMRIMAD 2025”

Informe: “Final de Resultados”

Número de proyecto: 22500010

Expediente: IMAMCA/2025/2

Duración: 01/01/2025– 31/12/2025

Coordinado en AIDIMME por: Ruben Niñerola González



GENERALITAT
VALENCIANA

IVACEYI

INSTITUTO VALENCIANO
DE COMPETITIVIDAD
E INNOVACIÓN

AIDIMME
Instituto Tecnológico

ÍNDICE

1	<u>INTRODUCCIÓN. OBJETIVOS DEL PROYECTO.....</u>	<u>1</u>
2	<u>MATERIALES Y MÉTODOS.</u>	<u>4</u>
3	<u>RESULTADOS OBTENIDOS</u>	<u>23</u>
4	<u>CONCLUSIONES.</u>	<u>31</u>

1 Introducción. Objetivos del proyecto

El proyecto EMRIMAD pertenece a la línea estratégica de I+D de AIDIMME **BIOMATERIALES**, en concreto a la sublínea de trabajo **BIOO** (Análisis y caracterización de estructuras de madera). Dentro de la Estrategia de especialización inteligente S3 de la Comunitat Valenciana 2021-2027, se encuadra en 1.1. Eco-innovación como palanca de competitividad.

La investigación del proyecto se dirige principalmente al **sector de la construcción y de la rehabilitación**, así como a profesionales de ese ámbito (arquitectos, arquitectos técnicos, ingenieros estructurales, prescriptores, etc.).

El objeto del proyecto consiste en desarrollar una metodología para la evaluación y rehabilitación inteligente de los forjados históricos de viguetas de madera, a fin de:

- Caracterizar la respuesta mecánica de las viguetas de madera de edificios históricos.
- Disminuir los impactos ambientales, económicos, sociales y culturales asociados a la construcción/rehabilitación de edificios.
- Promover la economía circular (en concreto, mediante el mantenimiento y la reutilización de materiales de construcción).
- Proporcionar nuevos usos a inmuebles históricos, cumpliendo la normativa actual y los requisitos adicionales derivados del nuevo uso del inmueble (oficinas, museos, instalaciones artísticas, etc.).

La conservación del patrimonio construido es una tarea de suma importancia y constituye un enorme reto, pues requiere adaptar edificios existentes a los requisitos de la normativa actual (Código Técnico de la Edificación), cuando muchas veces se construyeron antes de que existiera la normativa. En numerosos edificios históricos, así como en inmuebles de particulares, puede encontrarse un sistema constructivo de forjados de viguetas de madera y revoltones de ladrillo.

La mayor parte de los edificios existentes, incluso aunque no tengan carácter patrimonial o histórico, se construyeron mucho antes de que existiera el CTE y no suele conservarse documentación sobre sus métodos constructivos. Por ejemplo, más del 55% de los edificios residenciales son anteriores a 1980.



Imagen 1. Vista de una cubierta de mobila.

Los **objetivos específicos** del proyecto son los siguientes:

- 1) Caracterizar la respuesta mecánica de las viguetas de madera de edificios históricos.
- 2) Realizar un análisis probabilístico de las propiedades de la madera. Este tipo de análisis permite evaluar el efecto de la variabilidad de las propiedades de la madera sobre el comportamiento mecánico de ésta y de los forjados en conjunto.

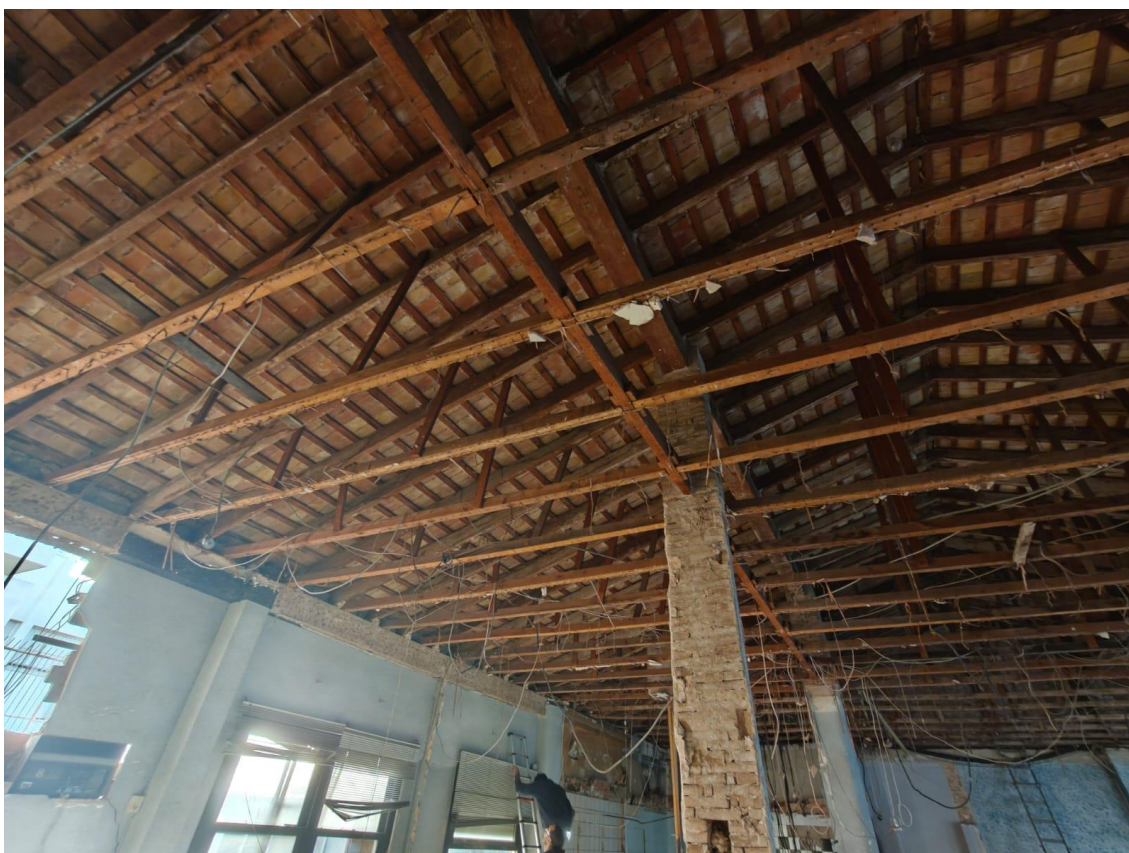


Imagen 2. Cubierta de mobila conformada por vigas de carga y viguetas.

Los **resultados** que se han alcanzado han sido:

- Caracterización de la resistencia de las viguetas de madera procedente de edificios históricos mediante los ensayos mecánicos según la normativa.
- Análisis de las propiedades de la madera antigua. Este tipo de análisis permite evaluar el efecto de la variabilidad de las propiedades de la madera sobre el comportamiento mecánico de ésta y de los forjados en conjunto en relación con la clasificación establecida en el CTE.
- Conocimiento de las capacidades de la madera antigua para su conservación y reutilización.

2 Materiales y métodos

2.1. Selección de madera antigua de derribo

Para el proyecto de 2025 se seleccionaron 85 viguetas de derribo de la madera que se encuentra mayoritariamente presente en la comunidad Valenciana. La mayoría es de pino “mobila” procedente de Estados Unidos durante la época 1890-1930. Todas las construcciones de dicha época, en valencia ciudad están construidas con esa madera.



Imagen 3. Detalle de la madera marcada por el importador.

Como puede verse en las imágenes la madera de mobila venia marcada con la marca del importador. La mobila corresponde principalmente a la especie *Pinus tadea*, si bien también puede corresponder a las especies *Pinus taeda* L., *Pinus elliottii* Engelm, *Pinus echinata* Mill y *Pinus palustris* Mill, que comparten características similares. Es una madera procedente de árboles de crecimiento lento, con mucho duramen, casi sin albura, y en consecuencia con una gran cantidad de resina. Por ello es extraordinariamente densa (en algunos casos su densidad supera los 1000 kg/m³, y no suele bajar de 850 kg/m³), muy resistente a xilófagos (termita, carcoma y hongos) y

presenta en ocasiones una resistencia mecánica superior a la correspondiente a la clase resistente C45 del Código Técnico de la Edificación. Esta resistencia tan elevada es más propia de algunas frondosas que de las coníferas. Debido a estas características es de mucho interés su reutilización en viviendas en rehabilitación.



Imagen 4. Vigas de derribo preparadas para su clasificación y reutilización.



Imagen 5. Vigas seleccionadas para el proyecto.



Imagen 6. Vigas de derribo para seleccionar para el proyecto.



Imagen 7. Vigas seleccionadas.

Para el proyecto se han seleccionado 45 viguetas, dado que todas no eran de mobila y algunas presentaban defectos que deberían tenerse en cuenta a la hora de su reutilización. 40 se ensayarán por métodos no destructivos y 5 por métodos destructivos

2.2. Ensayos no destructivos de las viguetas

Se realizan ensayos por ultrasonidos con el sylvatest 4. A su vez se mide la densidad y las dimensiones de la viga. Por lo general el largo está en torno a 5 metros, longitud representativa de las vigas en su uso estructural.

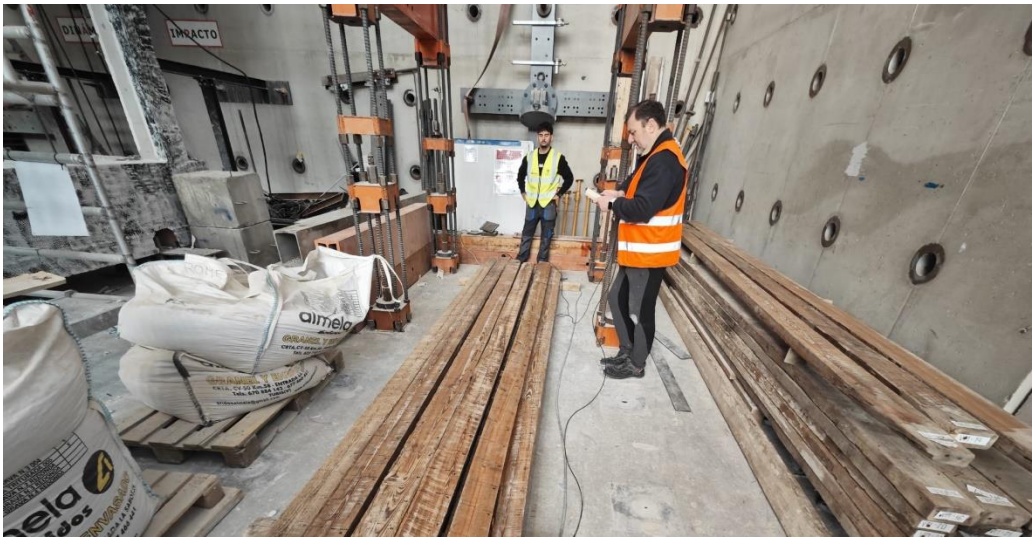


Imagen 8. Ensayo de vigas por ultrasonidos.

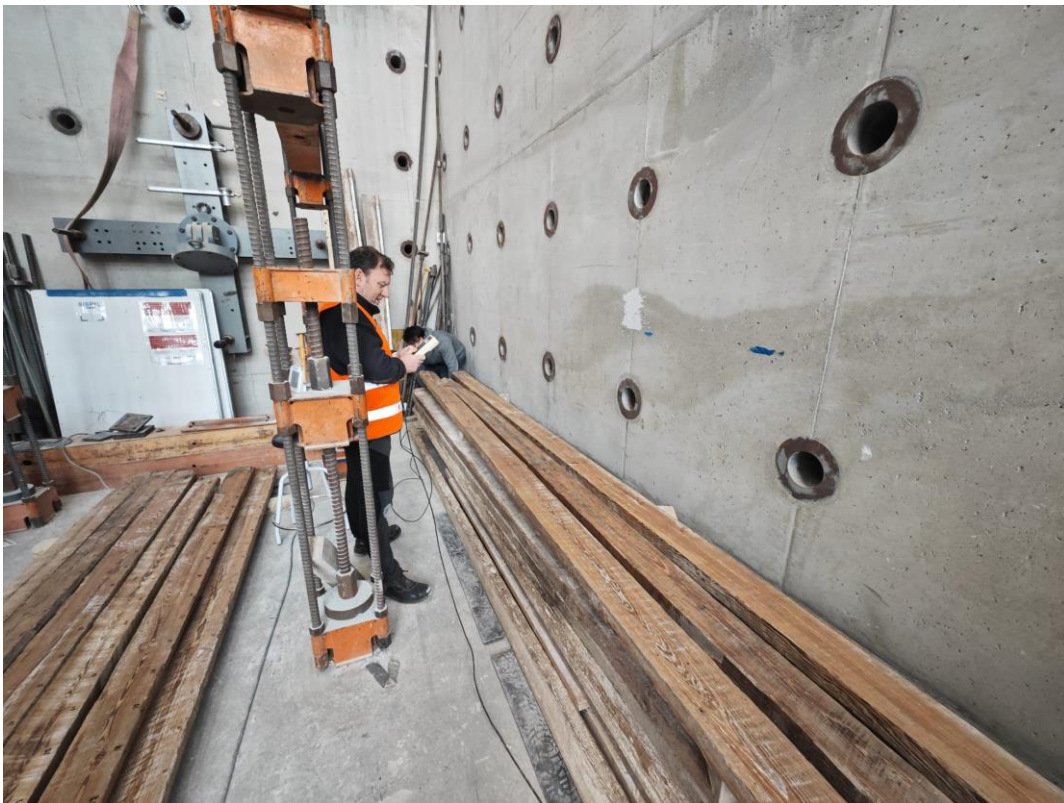


Imagen 9. Ensayo de vigas por ultrasonidos.

2.3. Ensayos destructivos

Resistencia a la flexión y módulo de elasticidad probetas.

Las vigas se han ensayado según la norma en 408 para módulo de elasticidad y módulo de rotura a flexión a cuatro puntos. También se han extraído 3 probetas de cada viga que se han ensayado según la norma de caracterización de madera UNE 56 537.

Resistencia a la flexión y módulo de elasticidad vigas.

Para determinar las propiedades mecánicas de las vigas y clasificarlas se aplica el método de la determinación del módulo de elasticidad global en flexión y el método de la resistencia a la flexión axial tal y como están definidos en la norma UNE-EN 408:2011+A1:2012 (*Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas*). Ambos métodos establecen una longitud mínima de viga igual a 19 veces la altura nominal de la sección.

Como procedimiento operativo, ambos métodos aplicados comparten requerimientos dimensionales: la viga se debe cargar en flexión sobre dos puntos simétricos con una luz igual a 18 veces la altura.

En el caso de no poder realizar el ensayo con esas condiciones, se permite modificar la distancia entre los puntos de carga y los apoyos, con una longitud no mayor de 1,5 veces el canto de la probeta; y la luz y longitud de la probeta pueden modificarse una cantidad no superior a tres veces la altura como máximo, siempre que se preserven en el ensayo las condiciones de simetría. La probeta debe mantenerse simplemente apoyada.

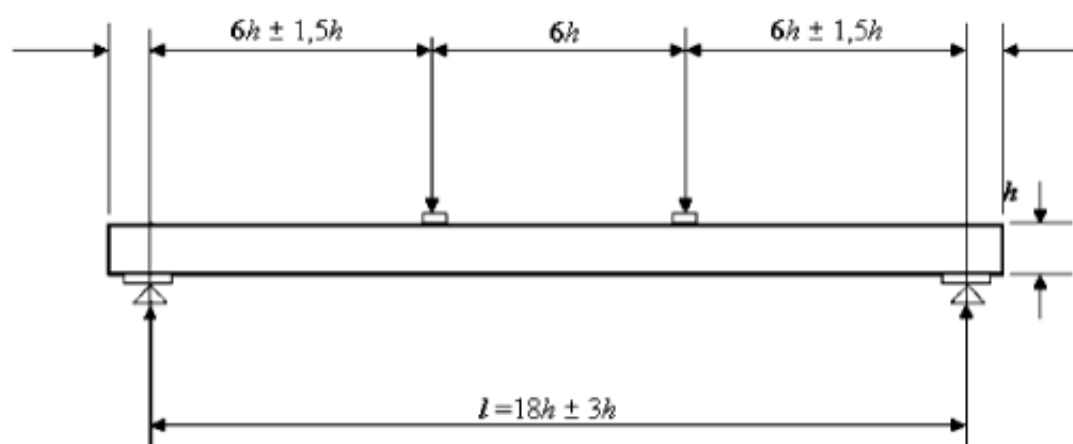


Imagen 10. Esquema del método de ensayo para la determinación del módulo de elasticidad global en flexión y de la resistencia a la flexión axial. Fte. UNE EN 408:2011+A1:2012.

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

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

Siendo:

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

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

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

Siendo:

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

Resistencia a la flexión y módulo de elasticidad probetas.

Se extraen probetas en forma de prisma recto cuadrangular de 20 mm de sección y longitud de 300 mm paralela a la dirección longitudinal de las fibras. Se coloca la probeta centrada sobre apoyos separados 240 mm.

A continuación, sobre la cara radial se aplica, mediante un cilindro horizontal, una fuerza progresiva en su parte central hasta alcanzar la rotura. La velocidad de desplazamiento del cilindro es de 5 mm/min.

La magnitud medida es la carga máxima a la cual se produce la rotura de la probeta, a partir de la cual se calcula la resistencia a la flexión que es la fuerza por unidad de área necesaria para producir la rotura por flexión, de acuerdo con la siguiente expresión

$$R = \frac{3FL}{2ba^2}$$

Donde:

R	es la Resistencia a la flexión, en N/mm ²
F	es la carga máxima, en Newtons
L	es la longitud entre los puntos de apoyo, en mm
b	es la anchura de la probeta, en mm
a	es el espesor de la probeta, en mm

MÓDULO DE ELASTICIDAD

Con el mismo procedimiento que el utilizado en el ensayo precedente se calcula el módulo de elasticidad, indicativo de la fuerza necesaria para que se produzca un determinado alabeo.

El módulo de elasticidad se calcula mediante la siguiente expresión

$$E_r = \frac{PL^3}{4ba^3f}$$

Donde:

E	es el Módulo de Elasticidad en N/mm ²
P	es el aumento de carga, en Newton, que produce una deformación de f mm
f	es el aumento de deformación, en mm, que produce un aumento de carga de P Newton.
L	es la longitud entre los puntos de apoyo, en mm
b	es la anchura de la probeta, en mm
a	es el espesor de la probeta, en mm



Imagen 11. Medición de las vigas seleccionadas para los ensayos destructivos.



Imagen 12. Vista de las 5 vigas.



Imagen 13. Ensayo de rotura a flexión (MOR) y medición del MOE de la viga 1.



Imagen 14. Viga 2 rota tras en ensayo.



Imagen 15. Viga 3 rota tras el ensayo.



Imagen 16. Viga 4 rota tras el ensayo.



Imagen 17. Viga 5 durante el ensayo.



Imagen 18. Probetas obtenidas del extremo de las vigas 1-5.



Imagen 19. Probetas obtenidas del extremo de las vigas 1-5.



Imagen 20. Ensayo de las probetas.

3 Resultados obtenidos

3.1. Ensayos no destructivos

La siguiente tabla, muestra los resultados obtenidos del ensayo de emisión-recepción de ultrasonidos para las 40 de las viguetas obtenidas en la anualidad 2024.

VIGA	DISTANCIA SENSORES (cm)	MOE (N/mm ²)	MOR (N/mm ²)
1	517	14985,6	41,7
2	518	16003,7	45,8
3	506	15426,2	43,5
4	471	16110,9	46,2
5	516	15432,0	43,5
6	518	14308,6	39,1
7	518	15072,1	42,1
8	517	16158,7	46,4
9	516	14665,1	40,5
10	512	14722,0	40,7
11	515	14704,9	40,6
12	520	13840,1	37,2
13	516	14291,7	39,0
14	469	15654,7	44,4
15	508	15707,7	44,6
16	517	12095,9	30,3
17	518	15170,3	42,5
18	452	17506,3	51,7
19	442	14106,9	38,3
20	516	11854,1	29,3
21	517	14916,6	41,5
22	520	17957,0	53,5
23	513	13746,3	36,8
24	520	12345,4	31,3
25	518	15813,9	45,0
26	524	14687,8	40,6
27	519	15849,4	45,2
28	520	13862,3	37,3
29	512	16834,9	49,1
30	508	16810,5	49,0
31	518	14945,3	41,6
32	501	16731,4	48,7
33	516	14246,8	38,8
34	514	15135,6	42,3
35	518	16194,5	46,5

36	518	16386,6	47,3
37	523	14001,0	37,8
38	519	14045,5	38,0
39	517	14051,1	38,0
40	511	13114,4	34,3

Tabla 1. Datos de MOE y MOR de los ultrasonidos.

PROMEDIO MOE	14987,3	PROMEDIO MOR	41,7
PERCENTIL Moe	12332,9	PERCENTIL MOR	31,2

Tabla 2. Promedios y percentiles de los ultrasonidos para calcular la clasificación del lote.

La madera sale que clasifica un C30 según la normativa y puede usarse conforme al CTE. Este es un dato muy alto en comparación a la madera maciza que actualmente podemos comprar en distribuidores de madera.

3.2. Ensayos destructivos

Los ensayos destructivos han arrojado resultados dispares que nos permiten evaluar la relación entre las roturas de la viga y la rotura de las probetas.

Estas también clasifican dentro del rango de C30 como el lote anterior. Por lo que permite comprobar que tanto la rotura a flexión como los valores de ultrasonidos son válidos para clasificar lotes de madera.

Viga	h	b	Largo	Fmax (N)	L	MOR (N/mm ²)	MOE (N/mm ²)
1	180	60	3550	20682	3240	34,47	14.333,74
2	180	75	3300	22094	3240	29,46	13.001,19
3	160	65	3930	26644	2880	46,11	10.430,62
4	180	80	3930	42224	3240	52,78	23.371,99
5	180	60	3700	41063	3240	68,44	23.043,88

Tabla 3. Resultados de MOE y MOR de las vigas.

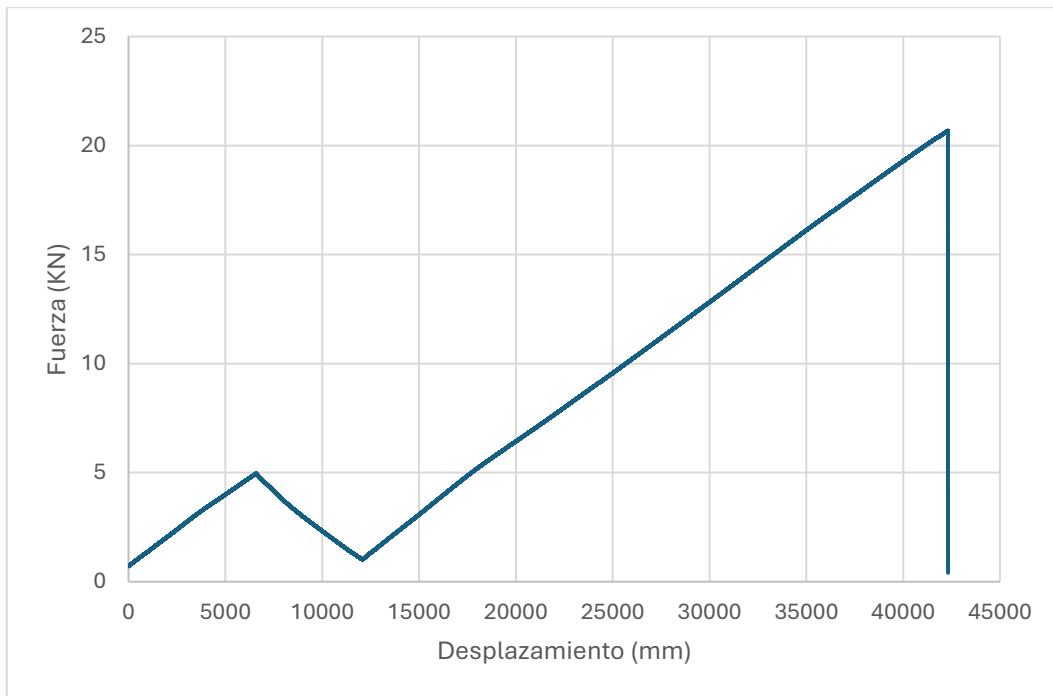


Imagen 21. Grafica Fuerza – Desplazamiento de la muestra 1.

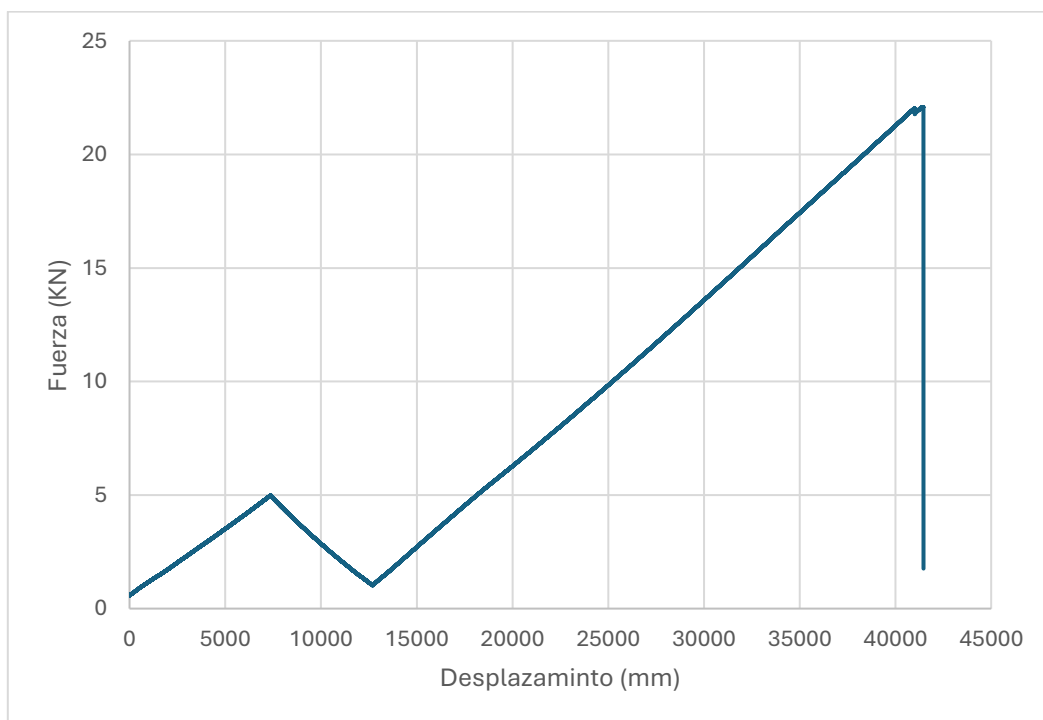


Imagen 22. Grafica Fuerza – Desplazamiento de la muestra 2.

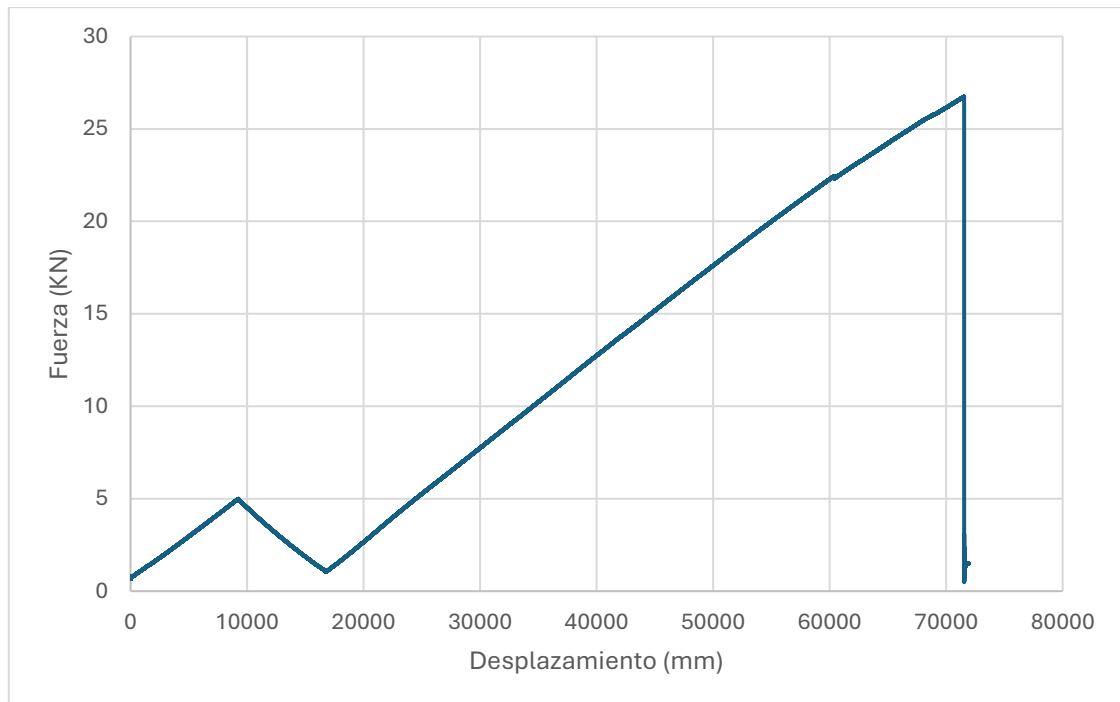


Imagen 23. Grafica Fuerza – Desplazamiento de la muestra 3.

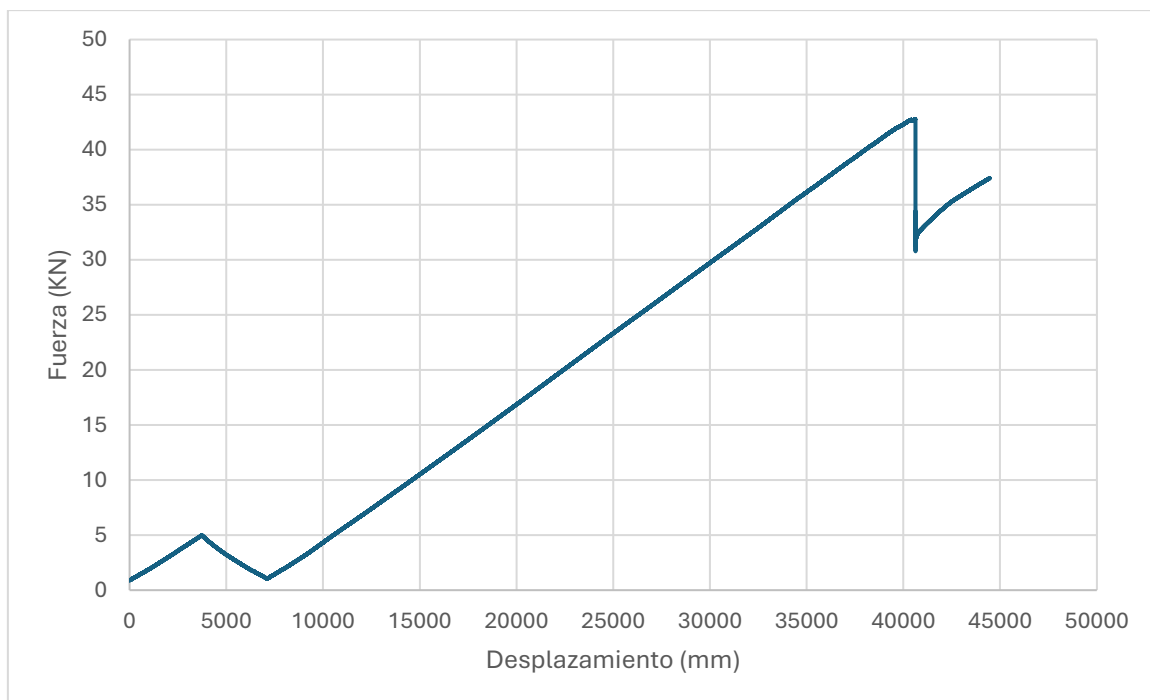


Imagen 24. Grafica Fuerza – Desplazamiento de la muestra 4.

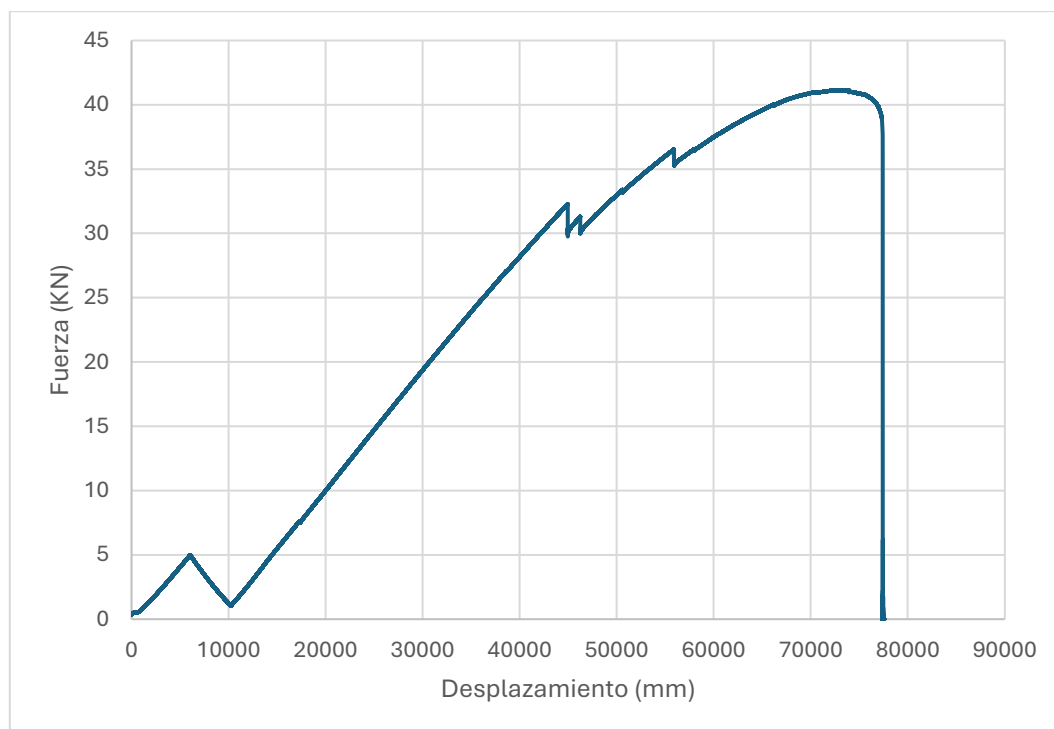


Imagen 25. Gráfica Fuerza – Desplazamiento de la muestra 5.

En las gráficas anteriores se puede observar las curvas de desplazamiento de cada viga. Son curvas características de la rotura y de ellas se obtienen los valores de MOE y MOR.

Los resultados de las probetas para cada viga han salido satisfactoria y en relación a la resistencia de la viga completa

VIGA	MOE	MOR
1	11166,7	98,0
2	11300,0	93,0
3	9690,0	100,6
4	19266,7	178,0
5	13866,7	134,7

Tabla 4. Resultados de MOE y MOR de las probetas pequeñas.

Si primero correlacionamos el MOE y MOR de la viga vemos como hay correlación pero si observamos el MOE de las vigas correlacionado con el MOE de las probetas vemos que hay más correlación.

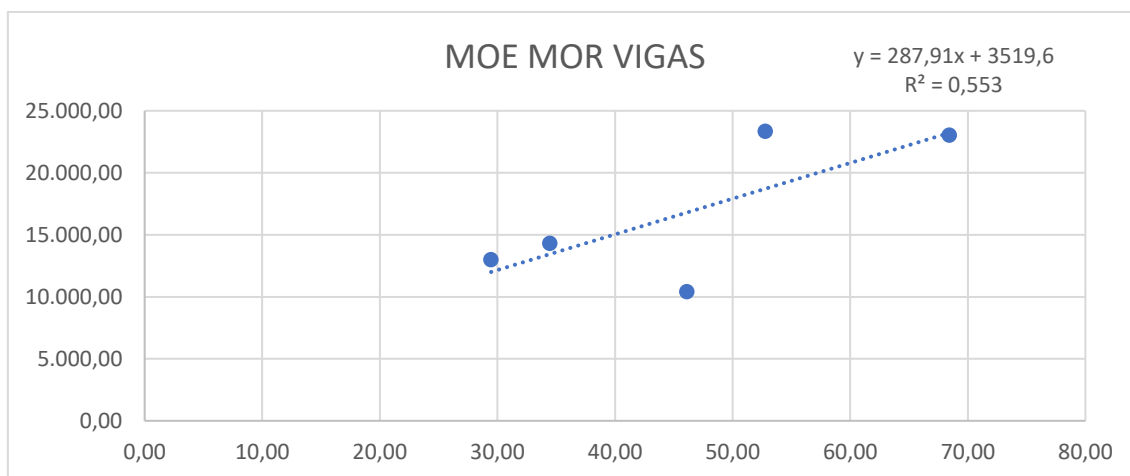


Imagen 26. Grafica de correlación del MOE Y MOR de las vigetas.

Aquí vemos la correlación entre MOE y MOR de las probetas:

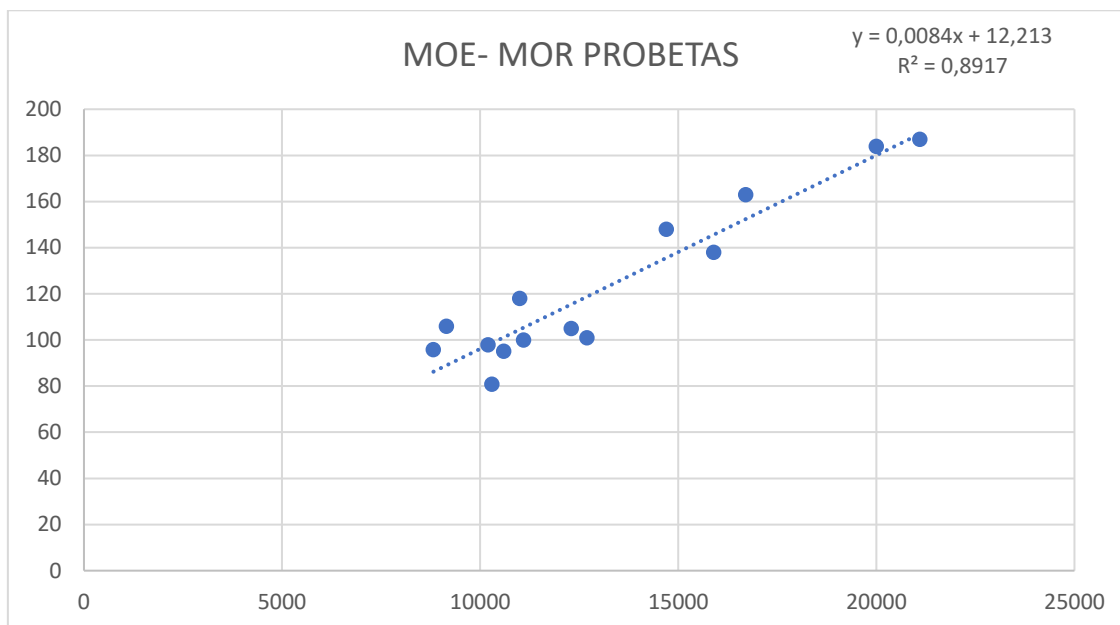


Imagen 27. Grafica de correlación entre MOE y MOR de probetas.

Y aquí vemos donde se correlaciona el MOE de viguetas y MOE de probetas. Es interesante resultado ya que podemos prever las propiedades de las viguetas a partir de probetas, teniendo en cuenta que debe aplicarse la fórmula para obtener valores correctos y no usar los valores de las probetas por ser más elevados.

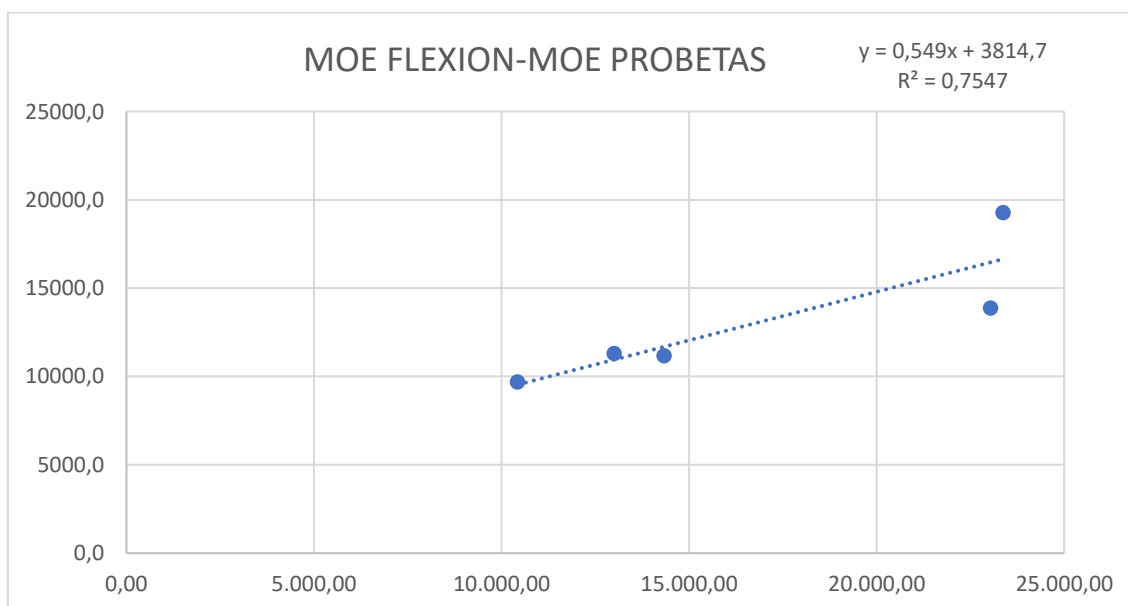


Imagen 28. Correlación entre MOE de viguetas y de probetas.

Aquí puede verse como el MOR de vigas y Mor de probetas tiene poca correlación.

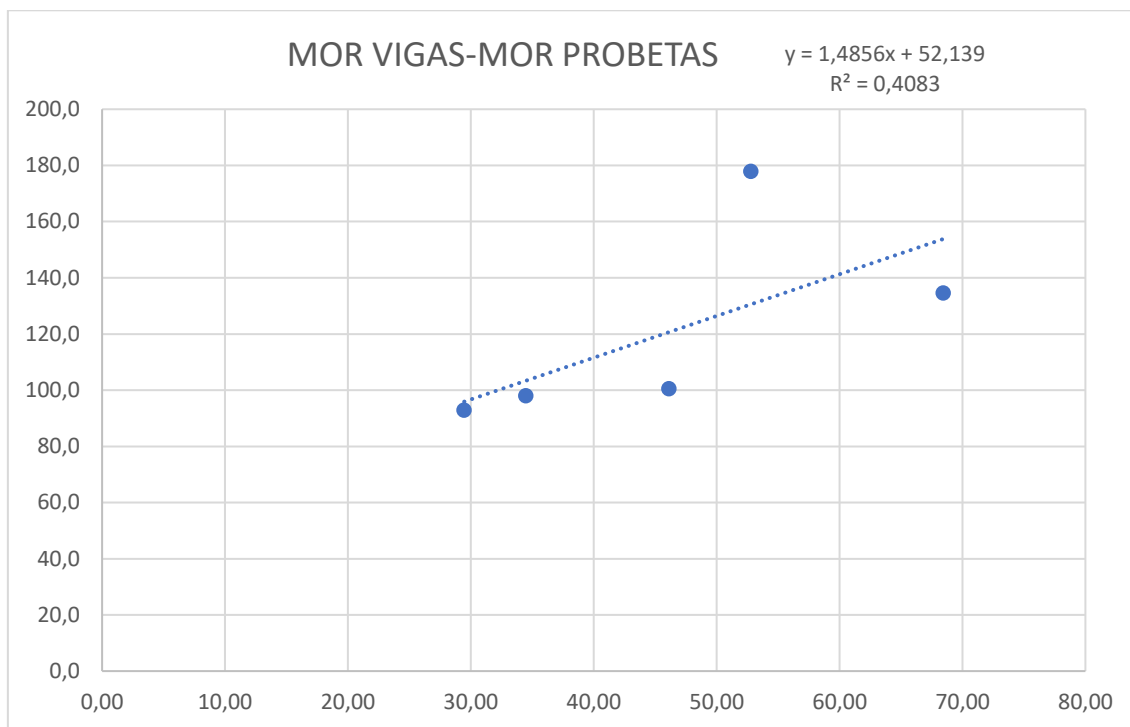


Imagen 29. Correlación entre MOR de viguetas y de probetas.

4 Conclusiones

4.1 Clasificación de la madera

Se ha podido clasificar la madera por metodologías no destructivas clasificándose la madera de forma exitosa como C30. Por métodos destructivos los resultados han sido los mismos.

En este sentido los métodos no destructivos pueden ser una solución a la rotura de las vigas y por tanto a la destrucción de elementos de madera, dado que el ultrasonidos permite reutilizar la viga sin problemas.

4.1 Correlaciones entre variables y predicciones

Se han podido ver como el MOE de las Vigas a rotura se correlaciona exitosamente con el MOE de probetas pequeñas, por lo que serviría como método alternativo para comprobar la resistencia y obtención del MOE. En cambio la predicción del MOR no ha sido tan buena como en el MOE.

AIDIMME

INSTITUTO TECNOLÓGICO

Domicilio fiscal —

C/ Benjamín Franklin 13, (Parque Tecnológico)
46980 Paterna, Valencia (España)
Telf., 961 366 070 | Fax 961 366 185

Domicilio social —

Leonardo Da Vinci, 38 (Parque Tecnológico)
46980 Paterna, Valencia (España)
Telf., 961 318 559 - Fax 960 915 446

aidimme@aidimme.es

www.aidimme.es