

TITULO DEL TRABAJO PARA EL INNOVATION INDUSTRY CONSTRUCTION CONGRESS

Guillem Segura Orenga¹, Manuel Peñalver Oltra¹, Miguel Redón Santafé²,
Javier Sola Ferrer¹, Rosa Pérez Campos

Resumen

Los métodos no destructivos para su uso en madera han aumentado su uso en los últimos años debido en gran medida a la rehabilitación y conservación del patrimonio. Técnicas como la resistografía, los ultrasonidos, mediciones acústicas, etc., dan lugar a un abanico de variables a medir muchas veces desconocidas para los agentes y empresas del sector de la construcción y rehabilitación. Su uso debe ir ligado a comprobaciones y calibraciones con los métodos destructivos, de modo que se asegure el cumplimiento normativo y las especificaciones establecidas por el CTE.

En la presente investigación se explicarán los métodos existentes y su posible uso y como se relacionan con los valores reales o métodos destructivos, y cómo, su uso combinado puede darnos información muy útil para conocer las propiedades de la madera. Por ejemplo, el resistografo se usa para detectar patologías y también para tener una estimación de la densidad y peso de los elementos de madera. Veremos también como los ultrasonidos nos permiten clasificar madera de derribo y de forjados, obteniéndose una muy buena correlación con los valores de rotura.

Esta investigación se ha realizado principalmente con distintas maderas de calidad recuperada y se realizann distintos modelos para predecir las características mecánicas de estos elementos para poder perdurar en las edificaciones o para poderse reciclar.

Palabras Clave: Madera antigua, Técnicas no destructivas, Clasificación Resistente, rehabilitación

1 Introducción

El fin de este estudio es la necesidad de establecer una clasificación estructural fiable para la madera antigua que permita su reutilización o rehabilitación segura. Actualmente, el Código Técnico de la Edificación (CTE) establece requisitos de seguridad para estructuras de madera, pero no contempla específicamente las particularidades de la madera antigua. Esto genera un vacío normativo, ya que, a diferencia de la madera nueva que cuenta con marcado CE y certificados de resistencia, la madera recuperada o en servicio carece de especificaciones técnicas claras.

El objetivo central es aplicar Técnicas No Destructivas (TND), como ultrasonidos, vibraciones inducidas y resistografía, con el finara evaluar estos elementos sin comprometer su integridad, validando posteriormente los resultados mediante ensayos destructivos de flexión según la norma UNE-EN 408. Este enfoque no solo tiene un interés técnico para la inspección de edificios patrimoniales, sino también un interés práctico y ambiental, alineándose con las

directivas de la Unión Europea que promueven la sostenibilidad y la reutilización de materiales de construcción frente a alternativas como el acero o el hormigón.

La madera se define como un material orgánico, heterogéneo y fuertemente anisotrópico, cuyas propiedades físicas y mecánicas varían según su origen natural. La madera antigua, específicamente, es aquella que ha estado en servicio por periodos prolongados, lo que la diferencia de la madera nueva debido a su exposición continuada a diversos agentes degradadores tanto boticos como abióticos. También afectan las cargas a las que ha estado sometida la madera, que puede producir deformaciones que modifican las propiedades resistentes.

La evaluación no destructiva se define como la ciencia de identificar propiedades de un material sin alterar su capacidad de uso final. Históricamente, estas técnicas se desarrollaron para clasificar madera nueva en aserraderos, pero su aplicación en estructuras existentes ha ganado relevancia en las últimas décadas. Las técnicas fundamentales utilizadas en el presente trabajo: la resistografía, Utilizada desde 1985 para detectar degradaciones internas y estimar la densidad mediante la resistencia a la penetración de una aguja; Emisión-Recepción de Ultrasonidos: Permite medir la velocidad de propagación de ondas para obtener el módulo de elasticidad (MOE) y la resistencia a la flexión dinámica; Vibraciones Inducidas: Estima la capacidad resistente golpeando el elemento y registrando la velocidad de las ondas de impacto.

El uso de estas técnicas está respaldado por normativas como la UNE 41805-8:2009 IN, que admite su empleo para la valoración patológica de estructuras de madera en el diagnóstico de edificios. Los datos obtenidos por la técnicas destructivas y no destructivas permiten obtener distintos parámetros y valores, que junto con los datos tomados visualmente o con herramientas manuales serán tratados estadísticamente mediante técnicas de IA random forest y así obtener modelos predictivos.

2 Objetivos.

El objetivo principal de la memoria de este trabajo es investigar la aplicación y validez de la evaluación no destructiva (END) para la caracterización de madera antigua de uso estructural, tales como vigas, viguetas y cerchas. Podemos desglosar el objetivo principal en distintos objetivos específicos:

- Realización y aplicación de las técnicas no destructivas a 3 especies de madera mayormente empleadas en edificios antiguos y que actualmente se pueden comprar para rehabilitación.
- Formulación de hipótesis para obtener el MOE y MOR de ensayos destructivos a partir de ensayos destructivos de vigas para las 3 especies en su conjunto.
- Realización de análisis estadístico por métodos convencionales e innovadores.
- Obtención de qué variables pueden ser de mayor interés minimizando los ensayos para su aplicabilidad tanto para madera existente en las edificaciones como madera que pueda ser reciclada.

3 Materiales y métodos

3.1 Materiales y Muestras de Ensayo

Se seleccionaron 98 vigas de madera antigua con integridad estructural, recuperadas de edificios demolidos en el área mediterránea (específicamente Valencia) construidos entre 1900 y 1920. Las muestras se organizaron en cinco lotes representativos de tres especies:

- Mobila (Pino Amarillo del Sur): Dividida en dos calidades (A y B) según su densidad y presencia de nudos.
- Pino Silvestre (*Pinus sylvestris*): También dividido en dos lotes (A y B).
- Abeto (Género *Abies*): Un lote de vigas de mayor sección.

Los lotes tienen las siguiente escuadría y longitud: para la mobila A, vigas de 180x60 mm y una longitud de 4 metros; para la mobila B, vigas de 175x65 mm y una longitud de 3.78 metros; para *Pinus sylvestris* A, vigas de 150x60 mm y una longitud de 3.8 metros; para el pino silvestre, vigas de 160x60 mm y una longitud de 3,63 metros; y para el abeto, vigas de 200x75 mm y una longitud de 4 metros. Debido a que son vigas recuperadas de demolición, las secciones tienen un margen de error de ± 5 mm entre ellas, por lo que para los ensayos se han considerado las secciones reales para cada viga.



Figura 1. Vigas de uno de los lotes de madera recuperada. Fuente: AIDIMME.

3.2 Técnicas de Evaluación No Destructiva (TND) y visuales

La evaluación de madera antigua mediante técnicas no destructivas (TND) es fundamental porque permite obtener datos de resistencia sin comprometer la integridad de piezas que suelen tener valor histórico o estructural. En el estudio, se han empleado cuatro métodos con procedimientos específicos:

3.2.1 Clasificación Visual y Biológica

Para determinar el porcentaje de degradación, se extraen rodajas de todas las vigas, así como de los tercios que presentan degradaciones. De este modo, se extrae como mínimo una rodaja

por viga para las vigas más sanas y un máximo de tres rodajas para el caso de las vigas más degradadas.



Figura 2. Ejemplo de degradación. Fuente: AIDIMME.

3.2.2. Emisión y Recepción de Ultrasonidos

Se utiliza el equipo Sylvatest TRIO para medir la velocidad de propagación de ondas sonoras a través de la fibra. Se realizan un total de 10 mediciones por viga, combinando lecturas directas (sensores enfrentados), semidirectas e indirectas (sensores en ángulo). Permite obtener el módulo de elasticidad (MOE) y la resistencia a la flexión (MOR) dinámicos de forma instantánea. El moe se obtiene a partir de la velocidad del ensayo y la densidad de la viga (medición de peso y volumen).

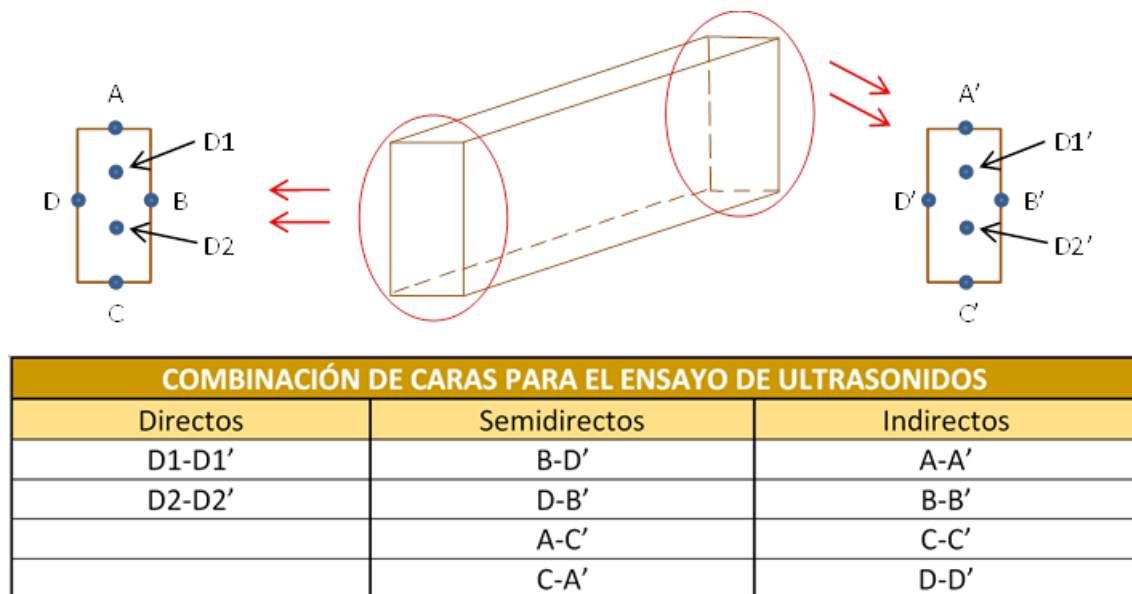


Figura 3. Esquema gráfico disposición y combinación de ultrasonidos realizados en las vigas..
Fuente: AIDIMME.

3.2.3. Vibraciones Inducidas

Para esta técnica se emplea el Timber Grader MTG, que estima las propiedades mecánicas mediante ondas de impacto. El equipo golpea un extremo de la viga y un sensor registra la velocidad de la onda de choque resultante. A diferencia de los ultrasonidos, esta técnica requiere que la viga esté totalmente aislada de otras superficies para evitar interferencias en la vibración, lo que dificulta su uso en estructuras que ya están puestas en servicio.



Figura 4. Ensayo con el equipo Timber grader MTG. Fuente: AIDIMME.

3.2.4. Resistografía

Utiliza el equipo IML-RESI PD400 para analizar el interior de la pieza mediante la penetración de una aguja de acero de 1,5 mm. Mide dos parámetros fundamentales: la resistencia a la perforación (*Drill resistance*) y la fuerza de avance (*Feed force*). Se realizan habitualmente 5 mediciones por eje (vertical y horizontal) a lo largo de la viga. Es una técnica excelente para determinar la densidad de la madera y detectar pudriciones internas o huecos ocultos que no son visibles desde el exterior.



Figura 5. Ensayo resistográfico en eje vertical Fuente: AIDIMME.

3.3 Ensayos Destructivos

Para verificar la fiabilidad de las TND, todas las vigas se sometieron a ensayos de rotura a flexión axial bajo la norma UNE-EN 408. Se utilizó una máquina de compresión adaptada con apoyos y un palpador central para medir la deformación real (flecha) de la viga. A partir de estos ensayos se obtuvieron los valores reales de MOE global de flexión y la resistencia a la flexión (MOR), que sirvieron como variables dependientes para el análisis estadístico.

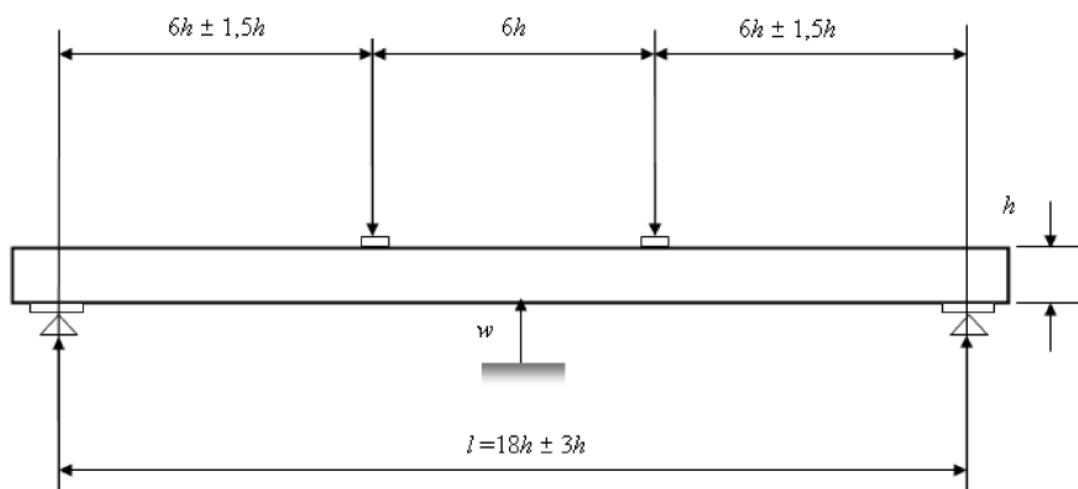


Figura 6. Disposición de ensayo para la medición del módulo de elasticidad global en flexión.

Fuente: Norma UNE EN 408:2011+A1.

3.4 Análisis Estadístico y Clasificación

Finalmente, los datos se procesaron mediante la herramienta WEKA para realizar análisis de regresión lineal y el modelo de Random Forest. Es un modelo de conjunto (ensemble) que combina múltiples árboles de decisión individuales para obtener una predicción más precisa y estable. El funcionamiento del modelo se basa en procesar diversas variables de entrada obtenidas mediante técnicas no destructivas (como la velocidad de ultrasonidos, datos de resistografía y niveles de degradación) para estimar los valores de resistencia real. Su operativa incluye:

- Entrenamiento y Prueba: El modelo utiliza una división de datos (un 80% para entrenamiento y un 20% para prueba) para aprender los patrones de comportamiento de la madera.
- Importancia de los Atributos: Una de sus funciones clave es determinar qué variables son más determinantes para la predicción (basándose en la disminución media de la impureza). Por ejemplo, en los modelos para predecir el MOE, la velocidad de ultrasonidos (Sylvatest) suele aparecer como el atributo más importante.
- Reducción del Error: Al promediar los resultados de 100 árboles, el Random Forest logra reducir el error y mejorar el ajuste estadístico.
- Estimaciones Out-of-Bag (OOB): El modelo realiza estimaciones internas durante su construcción para evaluar su propia complejidad y fiabilidad antes de enfrentarse a los datos de prueba.

En resumen, funciona como un sistema de votación masivo donde 100 árboles de decisión analizan las características de la madera y, en conjunto, ofrecen una predicción de resistencia mucho más robusta que la que ofrecería un solo modelo matemático

Así, el objetivo es formular ecuaciones y modelos que relacionen las variables no destructivas con las propiedades mecánicas reales. También se analizará la variabilidad de la implicación de pocas o muchas variables en la bondad de los modelos. A su vez, se compararan los distintos modelos y las mejorar que pueden ofrecer los modelos random forest.

4 Resultados.

Así, el objetivo es formular ecuaciones y modelos que relacionen las variables no destructivas con las propiedades mecánicas reales para todos los lotes en conjunto, dado que las distintas especies se pueden encontrar indistintamente en los mismos edificios. También se analizará la variabilidad de la implicación de pocas o muchas variables en la bondad de los modelos. A su vez, se compararan los distintos modelos y las mejorar que pueden ofrecer los modelos random forest.

4.1 Valores promedio por lotes

A continuación se muestran los resultados de las variables predictoras para los distintos lotes. Se puede observar como hay diferencia entre especies en cuanto a densidad y valores mecánicos. Los valores mecánicos vemos como después de más de 100 años son valores similares a los de la madera actual, incluso superiores en algunas especies como la mobila.

Tabla 1. Valores de las variables predictoras promedio para los distintos lotes

Lote	Timber Grader MOE (N/mm ²)	Vel. Sylvatest Media (m/s)	Feed Promedio	Drill Promedio	Densidad Viga (Kg/m ³)	Degradación Media (%)
Mobila A	16.119,7	5.258,6	31,97	19,95	703,4	0,50
Mobila B	15.110,4	5.274,7	32,80	19,93	652,5	1,76
Abeto	11.462,4	5.607,9	20,04	13,03	434,6	0,28
Pino Silvestre A	11.152,7	5.267,8	20,04	12,60	485,7	0,44
Pino Silvestre B	11.348,9	5.252,8	22,26	13,23	503,3	14,32

En la siguientes tabla se resumen los valores promedio de los ensayos mecánicos, estos valores serán los que vamos a entrenar y predecir con los modelos.

Tabla 2. Valores de las variables MOE y MOR en ensayos mecánicos promedio para los distintos lotes

Lote	Resistencia a la flexión axial (MOR) (N/mm ²)	MOE global flexión (N/mm ²)
Mobila A	45,4	16.064,9
Mobila B	42,4	14.850,7
Abeto	41,0	13.322,3
Pino Silvestre A (PS A)	37,3	15.091,2
Pino Silvestre B (PS B)	33,9	10.926,2

4.1 Modelo para la densidad.

En primer lugar es de interés mostrar la relación entre los valores del resistógrafo y la densidad. El Feed y el Drill vemos como son buenos predictores de la densidad por lo que la información que nos dan puede ser redundante para los modelos. De este modo a parte del

potencial de resistógrafo para obtener un valor de densidad, vemos cómo podemos ahorrarnos una medida que en algunos casos puede ser complicada de tomar (p.e. en elementos patrimoniales).

Tabla 3. Modelo que correlaciona los valores del resistógrafo con la densidad real de la viga.

Variable Objetivo	Correlación (r)	Coef. Determinación (R ²)	Fórmula / Variables de Entrada
Densidad Viga	0,9362	0,7734	213,386+6,6399·FeedProm+11,0854·DrillProm

4.2 Modelos de regresión lineal para MOE y MOR

Centrándonos en los modelos de regresión lineal teniendo en cuenta todos los lotes, vemos como los modelos estiman mucho mejor el MOE que el MOR. Por otro lado, vemos como la reducción de variables tiene cierta implicación en el r², pero podría ser interesante evaluar los tiempos de ensayo y la posibilidad de realizarlos. Los valores de los modelos en general son bastante buenos teniendo en cuenta que no se ha separado ni por lotes ni por especies.

Tabla 4. Modelos de regresión lineal.

Variable Objetivo	Correlación (r)	Coef. Determinación (R ²)	Fórmula / Variables de Entrada
MOE Global Flexión	0,8861	0,7436	6173,42 – 15,1·densidadviga 139,45·DegradMedia+87,25·FeedProm–85,72·DrillProm+1,314·TimberMOE–0,21·VelSylvMedia
MOE Global Flexión	0,8385	0,6794	–20886,75–183,74·DegradMedia+134,83·FeedProm+197,85·DrillProm+5,43·VelSylvMedia
Resistencia (MOR)	0,8083	0,5213	–19,64–0,02·Densidad–0,28·DegradMedia+0,37·FeedProm–1,26·DrillProm+0,004·TimberMOE+0,006·VelSylvMedia
Resistencia (MOR)	0,7468	0,4459	–85,11–0,46·DegradMedia+0,66·FeedProm–0,07·DrillProm+0,02·VelSylvMedia

4.3 Modelos de Árboles de decisión (random forest)

Vemos como estos modelos mejoran para ambas variables y en las distintas hipótesis (muchas y pocas variables). Se ha conseguido mejorar significativamente la correlación respecto a los modelos de regresión lineal. Esto indica un gran potencial a estos modelos basados en IA.

Tabla 5. Modelos de random forest.

Variable Objetivo	Correlación (r)	Coef. Determinación (R²)	Fórmula / Variables de Entrada
MOE Global Flexión	0,9374	~0,878*	Basado en todas las variables (Densidad, Degradación, Resistografía, Timber, Sylvatest).
MOE Global Flexión	0,9010	~0,811*	Basado en: Degradación, Resistografía (Feed/Drill) y Ultrasonidos.
Resistencia (MOR)	0,8496	~0,721*	Basado en todas las variables (Densidad, Degradación, Resistografía, Timber, Sylvatest).
Resistencia (MOR)	0,8460	~0,715*	Basado en: Degradación, Resistografía (Feed/Drill) y Ultrasonidos.

5 Conclusiones

Tras la investigación realizada sobre la caracterización de madera antigua mediante técnicas no destructivas (TND), se pueden extraer las siguientes conclusiones principales:

Validez de las Técnicas No Destructivas (TND): Se ha demostrado que el uso combinado de ultrasonidos, resistografía y vibraciones inducidas permite obtener una clasificación estructural fiable sin comprometer la integridad de las piezas. La correlación obtenida con los ensayos destructivos bajo la norma UNE-EN 408 valida estas tecnologías como herramientas fundamentales para la rehabilitación y el diagnóstico estructural.

Excelente Estado de la Madera Antigua: Los ensayos mecánicos revelan que maderas con más de 100 años de servicio, especialmente la Mobila, mantienen valores de resistencia y rigidez similares o incluso superiores a la madera nueva, alcanzando clasificaciones superiores a C30. Esto confirma su enorme potencial para ser reciclada y reutilizada en el sector de la construcción.

Eficacia de la Resistografía para la Densidad: Los parámetros de Feed (fuerza de avance) y Drill (resistencia a la perforación) han resultado ser excelentes predictores de la densidad real de las vigas (R²=0,7734). Esto permite simplificar los procesos de inspección in situ, eliminando en muchos casos la necesidad de tomar medidas físicas de peso y volumen que pueden ser complejas en elementos patrimoniales.

Superioridad de los Modelos de Inteligencia Artificial (Random Forest): El uso de modelos de Random Forest ha mejorado significativamente la precisión de las predicciones en comparación con las regresiones lineales tradicionales. Para el Módulo de Elasticidad (MOE), se alcanzó una correlación de 0,9374, lo que demuestra el gran potencial de la IA para tratar la heterogeneidad de la madera antigua.

Predicción del MOE frente al MOR: En todos los modelos analizados, el Módulo de Elasticidad (MOE) se estima con mucha mayor precisión que la Resistencia a la flexión (MOR). No obstante, los modelos de Random Forest han logrado elevar la fiabilidad en la predicción del MOR hasta un coeficiente de correlación de 0,8496, superando las limitaciones de los modelos matemáticos simples.

Sostenibilidad y Cumplimiento Normativo: La metodología propuesta permite salvar el vacío normativo del CTE respecto a la madera antigua, facilitando su integración en proyectos de edificación modernos. Además, la reutilización de estos elementos estructurales se alinea con las directivas de la Unión Europea sobre economía circular, reduciendo el impacto ambiental frente al uso de materiales convencionales como el acero o el hormigón.

6 Bibliografía

- [1] Pellerin RF, Ross, RJ. Nondestructive Evaluation of Wood. Forest Products Society: Madison, WI, USA, 2002.
- [2] Abián MA, Segura G. Evaluación del estado estructural de la madera después de incendios mediante técnicas no destructivas (Assessment of fire-damaged structural timber by non-destructive testing). Proceedings of the IV Fire Engineering Conference. Valencia, Spain, 2016.
- [3] Llana DF, Íñiguez-González G, Díez MR, Arriaga F. Nondestructive testing used on timber in Spain: A literature review. Maderas. Ciencia y tecnología 2020; 22(2): 133-156.
- [4] Ondrejka V, Gergel T, Bucha T, Pástor M. Innovative methods of non-destructive evaluation of log quality. Central European Forestry Journal 2020; 66:1-11.
- [5] Peñalver Oltra, M., Redón Santafé, M., Abian Perez, M. A., & Segura Orenga, G. (2020). Investigación sobre la aplicación y validez de la evaluación no destructiva para madera antigua estructural.
- [6] Reinprecht L. Wood Deterioration, Protection and Maintenance. Wiley-Blackwell, 2016.
- [7] 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.