

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE MONTES, FORESTAL
Y DEL MEDIO NATURAL



METODOLOGÍA CON TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS PARA LA EVALUACIÓN IN
SITU DE PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE PIEZAS ESTRUCTURALES DE
MADERA DE CONÍFERAS

TESIS DOCTORAL

CARLOS OSUNA SEQUERA
Ingeniero de Montes

2023



PROGRAMA DE DOCTORADO EN INVESTIGACIÓN FORESTAL AVANZADA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE MONTES, FORESTAL Y
MEDIO NATURAL

METODOLOGÍA CON TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS PARA LA EVALUACIÓN
IN SITU DE PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE PIEZAS ESTRUCTURALES
DE MADERA DE CONÍFERAS

CARLOS OSUNA SEQUERA

Ingeniero de Montes

DIRECTOR

FRANCISCO ARRIAGA MARTITEGUI

Doctor Arquitecto

2023

Tribunal nombrado por el Magfco. y Excmo. Sr. Rector de la Universidad Politécnica de Madrid, el día de de 2023.

Presidente:

Vocal:

Vocal:

Vocal:

Secretario:

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis el día de de 2023, en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Montes, Forestal y del Medio Natural de Madrid.

Calificación:

El/LA PRESIDENTE/A

LOS VOCALES

EL SECRETARIO

AGRADECIMIENTOS

A lo largo de este camino he conocido bellísimas personas que me han acompañado dejando lo mejor de sí mismas incondicionalmente, otras han estado siempre conmigo desde el principio sin dejar en ningún momento de apoyarme.

Quiero agradecer con todo mi corazón a Alba haber estado siempre desde el primer hasta el último momento en todos los proyectos en los que me he embarcado acompañándome sin dudar, en especial, a ese poder mágico de sacar lo mejor de mí en cualquier momento siempre con una sonrisa y energía infinita (y mucha paciencia).

También quiero agradecer a mi director de tesis Francisco su incalculable dedicación, amistad y enseñanza todos estos años. Quiero destacar que siempre has estado disponible y abierto para discutir ideas, responder a mis inquietudes y brindar orientación en cada paso de esta tesis. Tu mentoría no solo ha contribuido a mi crecimiento académico, sino también a mi desarrollo personal y profesional. Gracias por compartir tu experiencia y conocimiento con generosidad y por creer en mi capacidad para enfrentar los desafíos que han surgido a lo largo de esta tesis. Tu compromiso y liderazgo han sido una inspiración esencial en mi vida, y siempre serás para mí un director y amigo excepcional.

No puedo olvidar todo el cariño que guardo a todo el grupo de investigación Construcción con Madera de la escuela, en especial a Beatriz, Guillermo, Miguel, Nacho y Daniel, que desde los primeros momentos han estado a mi lado y me han alegrado la semana con un buen café y compañía, además de los innumerables buenos momentos juntos.

Gracias también a Eva, Ramón, Juan Carlos, Emilio Carpin, Quique, Juan, María, Emilio, Rafael, Maite, Raquel, Antonio, Eduardo y todos los que desde del INIA han trabajado mano a mano conmigo y me han enseñado y me siguen enseñando tanto cada día.

A mi familia, quienes han sido un gran apoyo en cada paso. Su ánimo constante ha sido uno de los grandes pilares.

A Antonio Arce de la empresa INTRAMA S.A. por la donación del material de ensayo que ha dado lugar a la realización de la presente tesis, así como todas las facilidades y ayuda recibidas para la ejecución de las primeras fases del trabajo en sus instalaciones.

A toda la gente agradable que esta tesis me ha dado la oportunidad de conocer como Gabriel y Guadalupe, gracias por compartir este apasionante viaje, ¡toda una montaña rusa! En definitiva, gracias a todo el mundo que ha dedicado un huequito de su tiempo a estar ahí.

ÍNDICE

ÍNDICE.....	I
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	IX
ABREVIATURAS.....	XI
RESUMEN	XIII
ABSTRACT	XV
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Estudios previos generales	1
1.2 Estudios referentes a la variación de la sección.....	2
1.3 Estudios referentes al efecto de la longitud	4
1.4 Estudios referentes a la densidad	5
1.5 Predicción con métodos visuales	8
1.6 Predicción con métodos acústicos	12
1.7 Predicción con vibración.....	13
1.8 Ejemplos de casos prácticos.....	15
2 OBJETIVOS.....	17
3 MATERIAL Y MÉTODOS.....	19
3.1 Material.....	19
3.1.1 Procedencia e historia	19
3.1.2 Descripción de la estructura de la cubierta.....	22
3.1.3 Identificación de la especie de madera.....	24
3.1.4 Descripción de las probetas analizadas.....	26
3.2 Equipos e instalaciones	27
3.2.1 Instalaciones de ensayo.....	27
3.2.2 Máquina universal de ensayo	28
3.2.3 Equipos no destructivos	30
3.2.4 Equipos semi destructivos.....	37
3.2.5 Equipos auxiliares	38
3.3 Piezas largas.....	41
3.3.1 Secciones de referencia	41
3.3.2 Contenido de humedad	41

3.3.3	Clasificación visual.....	42
3.3.4	Módulo de elasticidad dinámico mediante la medición de tiempos de transmisión de la onda	43
3.3.4.1	Velocidad global	43
3.3.4.2	Velocidad local.....	43
3.3.4.3	Tipos de mediciones: directas, semidirectas e indirectas	44
3.3.4.4	Módulo de elasticidad dinámico	45
3.3.4.5	Efecto de longitud.....	45
3.3.5	Módulo de elasticidad dinámico mediante el análisis de vibración longitudinal.....	46
3.3.6	Efecto de la variación en la geometría de la sección en mediciones con técnicas no destructivas (acústicas y vibración) en piezas largas	47
3.4	Piezas cortas	49
3.4.1	Secciones de referencia	49
3.4.2	Contenido de humedad.....	49
3.4.3	Clasificación Visual.....	50
3.4.4	Estimación de la densidad	51
3.4.5	Módulo de elasticidad dinámico mediante la medición de los tiempos de transmisión de la onda	52
3.4.6	Módulo de elasticidad dinámico mediante vibración longitudinal....	53
3.4.6.1	Efecto de la variación de la sección	54
3.4.6.2	Influencia de la posición de la pieza en el árbol.....	55
3.4.7	Ensayos mecánicos a flexión.....	55
4	INFLUENCIA DE LA VARIACIÓN DE LA SECCIÓN	57
5	INFLUENCIA DE LA LONGITUD	67
6	ESTIMACIÓN DE LA DENSIDAD	77
7	PREDICCIÓN CON MÉTODOS ACÚSTICOS.....	87
8	PREDICCIÓN CON VIBRACIÓN	101
9	CASO PRÁCTICO.....	119
10	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	135
10.1	Variación de la sección. Sección nominal	135
10.1.1	Tamaño de la sección nominal en piezas largas	135
10.1.2	Módulo de elasticidad en piezas largas	135
10.1.3	Método para definir las relaciones entre las secciones transversales nominales y el MOR y MOE _{sta}	137

10.2	Propiedades físicas y mecánicas y clasificación visual.....	138
10.2.1	Influencia de la posición de las piezas en el tronco en las propiedades mecánicas obtenidas con vibración.....	138
10.2.2	Propiedades físico-mecánicas vs. clasificación visual.....	139
10.2.3	Influencia de la posición de las piezas en la altura del tronco para la predicción de las propiedades mecánicas con método de vibración en piezas cortas	142
10.3	Influencia de la dirección de crecimiento del árbol en la velocidad de propagación de ondas.....	142
10.4	Influencia de la longitud	143
10.4.1	Velocidades de testa a testa con diferentes equipos.....	143
10.4.2	Influencia de la longitud en la determinación de la velocidad con lecturas indirectas y semidirectas.....	144
10.4.3	Comparación entre las velocidades de testa a testa con las velocidades globales cruzadas en el canto y cruzadas entre caras.....	146
10.4.4	Velocidades locales.....	146
10.5	Influencia de la disposición de lectura en la velocidad de transmisión de ondas	147
10.6	Modo de medición de la velocidad con mayor capacidad de predicción..	148
10.7	Estimación de la densidad	149
10.7.1	Densidad aparente y densidad real	149
10.7.2	Variación de la densidad a lo largo de la pieza.....	149
10.7.3	Mediciones con técnicas no destructivas a lo largo de la pieza.....	150
10.7.4	Predicción de la densidad vs. número de mediciones	150
10.7.5	Comparación con otras investigaciones	152
10.8	Predicción con métodos acústicos.....	152
10.8.1	Densidad estimada vs. densidad real para la determinación del módulo de elasticidad dinámico	152
10.8.2	Ratio entre módulo de elasticidad dinámico y módulo de elasticidad estático	153
10.8.3	Predicción del módulo de elasticidad y la resistencia.....	155
10.8.4	Consideración de los parámetros de clasificación para la predicción de las propiedades mecánicas	156
10.8.5	Modelos propuestos	157

10.8.6	Modos de fallo	157
10.9	Predicción con vibración.....	158
10.9.1	Densidad estimada vs. densidad real para la determinación del módulo de elasticidad dinámico.....	158
10.9.2	Predicción del módulo de elasticidad y la resistencia	159
10.9.3	Consideración de los parámetros de clasificación para la predicción de las propiedades mecánicas.....	160
10.9.4	Modelos propuestos.....	160
10.10	Caso práctico.....	161
11	CONCLUSIONES.....	165
11.1	Variabilidad de la sección transversal	165
11.2	Propiedades físicas y mecánicas y clasificación visual.....	165
11.3	Influencia de la longitud	166
11.4	Densidad	166
11.5	Propiedades acústicas.....	167
11.6	Vibración	168
11.7	PROPUESTA DE MÉTODO	169
11.7.1	Objeto	169
11.7.2	Diferenciación de lotes.....	169
11.7.3	Dimensiones/Geometría	170
11.7.4	Estimación de la densidad	170
11.7.5	Medición de los tiempos de transmisión de ondas	170
11.7.6	Módulo de elasticidad dinámico.....	171
11.7.7	Módulo de elasticidad estático.....	171
11.7.8	Resistencia característica a flexión	171
12	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	173
	BIBLIOGRAFÍA	175
	ANEXOS.....	191
	ANEXO A. IDENTIFICACIÓN MICROSCÓPICA DE LA ESPECIE DE MADERA	191
	ANEXO B. EJEMPLOS DE ESTADILLOS EMPLEADOS PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS.....	195
	B1- Ejemplo de estadillo de ensayo a flexión en piezas cortas	195

B2- Ejemplo de estadillo de conteo de anillos	196
B3- Ejemplo de estadillo de conteo de anillos	197
B4- Ejemplo de estadillo longitudes de los extremos hasta primera marca...	198
B5- Ejemplo de estadillo medidas con forcípula en piezas cortas	199
B6- Ejemplo de estadillo ensayos no destructivos en piezas cortas	200
B7- Ejemplo de estadillo ensayos no destructivos en piezas largas	201
ANEXO C. RELACIÓN DE DATOS MEDIDOS EN PIEZAS LARGAS.....	203
C1- Leyenda.....	204
C2- Datos geométricos	209
C3- Datos de masa y densidad volumétrica y real	210
C4- Datos de mediciones con técnicas no destructivas.....	211
C4.1- Datos con equipo Portable Lumber Grader	211
C4.2- Datos con equipo MicroSecond Timer	211
C4.3- Datos con equipo Sylvatest Duo.....	216
C4.4- Datos con equipo USLab	220
C5- Datos de ensayo a flexión.....	221
ANEXO D. RELACIÓN DE DATOS MEDIDOS EN PIEZAS CORTAS	229
D1- Leyenda	230
D2- Datos geométricos.....	240
D3- Datos de contenido de humedad	245
D4- Datos de densidad.....	248
D5- Datos de mediciones con técnicas no destructivas.....	253
D5.1- Datos con el equipo Portable Lumber Grader	253
D5.2- Datos con el equipo MicroSecond Timer.....	254
D5.3- Datos con el equipo Sylvatest Duo	259
D5.4- Datos con el equipo USLab	263
D5.5- Datos con el equipo de Arranque de Tornillos.....	266
D5.6- Datos con el equipo Pilodyn	268
D5.7- Datos con el equipo WoodPecker.....	271
D5.8- Datos con el equipo equipo Woodex.....	275
D6- Datos de ensayo a flexión.....	279
ANEXO E. GEOMETRÍA DE LAS SECCIONES DE LAS PIEZAS.....	285

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Representación en perspectiva axonométrica del Teatro Gran Coliseo de Carlos III, extraída folleto publicitario utilizado para promocionar su proceso de rehabilitación. (Dirección General de Arquitectura Vivienda y Suelo, 2015).	20
Figura 2. Representación de la sección longitudinal y la planta baja del Teatro Gran Coliseo de Carlos III, extraída del folleto publicitario utilizado para promocionar su proceso de rehabilitación.(Dirección General de Arquitectura Vivienda y Suelo, 2015).	22
Figura 3. Fotografía del desmontaje de la cubierta del Teatro Real Carlos III de Aranjuez, España. Foto: Bayón Arquitectos S.A.	23
Figura 4. Esquema de una cercha de la cubierta del edificio y detalle de los extremos de uno de los pares.	24
Figura 5. Resultados del estudio de identificación para la distinción entre piezas de pino silvestre y laricio. Los cuadrados negros son las piezas de la presente tesis. Fuente: Trobajo, E. (Comunicación personal).	26
Figura 6. Pila de piezas de madera completa de 11 m de longitud en las instalaciones de Intrama S.A.	27
Figura 7. Pila de madera de piezas seccionadas preparadas para su traslado a la zona de ensayo.	28
Figura 8. Ensayo a flexión biapoyado según norma UNE-EN 408:2011+A1:2012 (2012). Ejemplo de disposición de la pieza no. 03-I reconstruyendo la imagen a partir de tres imágenes frontales.	29
Figura 9. Sylvatest Duo con sensores cónicos de 22 kHz.....	30
Figura 10. USLab con sensores cónicos de 45 kHz.	31
Figura 11. MicroSecond Timer con sensores con forma de pincho y martillo de accionamiento de la onda acústica.	32
Figura 12. Detalle de los extremos de la pieza medida con PLG.....	33
Figura 13. Xilohigrómetro de resistencia eléctrica Hydromette RTU 600 con electrodos, calibrador, captador de humedad ambiental.	34
Figura 14. WoodPecker density meter device.	35
Figura 15. Pilodyn con tapa metálica y pieza en T para su carga.....	36
Figura 16. Equipo de arranque de tornillos con célula de carga, soporte y consola.	36
Figura 17. Resístógrafo IML Resi F400S.	37
Figura 18. Detalle de los componentes del WoodExtractor.	38
Figura 19. Ensayo mecánico a flexión en piezas de 11 m empleando un sistema de placas de acero y soportes metálicos.	39
Figura 20. Secciones transversales de referencia representadas longitudinalmente cada 1 m en una pieza de 11 m.	41
Figura 21. Esquema de medición de velocidad local entre dos puntos i y j. Fuente: (Osuna-Sequera, Arriaga, et al., 2019).	44

Figura 22. Detalle de las mediciones directas, indirectas y semidirectas. Fuente: (Osuna-Sequera et al., 2021).....	45
Figura 23. Ensayo de vibración longitudinal. Disposición del impacto con martillo, micrófono, caja de balanzas y software de procesamiento.	47
Figura 24. Métodos de medición de la sección transversal. a) ejemplo de medición con forcípula; b) ejemplo de sección transversal obtenida para el ancho y alto de la pieza en comparación con la forma perimétrica real; c) obtención del área real ajustado al perímetro real de la pieza.	48
Figura 25. Subdivisión de piezas largas en dos cortas del grupo I y II y secciones de referencia.	49
Figura 26. Localización de las mediciones de técnicas no destructivas puntuales en piezas cortas.	52
Figura 27. Esquema de los métodos A, B, C y D para la determinación de una sección nominal de la pieza	54
Figura 28. Ejemplo la disposición del ensayo a flexión de la pieza corta No. 13-II de acuerdo con la norma UNE-EN 408 (2012). Fenómeno de fallo: rotura por cortante.	56

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Lista de masas en gramos asociados a cada una de las placas de acero empleadas para el ensayo a flexión no destructivo en piezas largas.....	40
Tabla 2. Clasificación visual con diversos criterios. Fuente: (Osuna Sequera, 2017).	42

ABREVIATURAS

CoV	Coeficiente de variación en %.
WP	Equipo no destructivo penetrómetro WoodPecker.
SWRM	Equipo no destructivo de arranque de tornillos o Screw Withdrawal Resistance Meter en inglés.
PIL	Equipo no destructivo penetrómetro Pilodyn 6J.
WoodEx	Equipo semi-destructivo de extracción de virutas.
VSG	Clasificación visual o Visual Strength Grading en inglés.
KDR	Relación de diámetro de nudo definido como el diámetro del nudo dividido entre la cara o canto.
CKDR	Relación de diámetro de nudo concentrado definido como la suma de los KDR de todos los nudos dentro de cualquier longitud de 15 cm en la pieza.
MOE_{dyn}	Módulo de elasticidad dinámico en N mm ⁻² .
PLG	Equipo no destructivo de vibración Portable Lumber Grader.
MTG	Equipo no destructivo de vibración Movable Timber Grader.
STIG	Equipo no destructivo de vibración Strength Timber Grader.
h	Altura de la sección de una viga en mm.
L	Longitud o luz de una viga en m.
b	Ancho de la sección de una viga en mm.
MOE_{sta,glo}	Es el módulo de elasticidad global en flexión en N mm ⁻² .
MOR	Es la resistencia a flexión en N mm ⁻² .
G	Es el módulo de elasticidad transversal en N mm ⁻² .
w	Deformación o flecha de un ensayo a flexión en mm.
F	Fuerza en N.
I	Momento de inercia en mm ⁴ .
USLab	Equipo no destructivo de transmisión de ondas ultrasónicas USLab.
MST	Equipo no destructivo de transmisión de ondas de impacto.
RCS	Sección transversal de referencia de una viga, Reference Cross-Section en inglés.
MEG	Madera clasificada visualmente como Madera Estructural de Gruesa escuadría según la norma de clasificación visual UNE 56544 correspondiente.
ToF	Tiempo de transmisión de la onda o tiempo de vuelo medido entre dos puntos, en inglés Time-of-Flight habitualmente medido en μ s y empleado en ecuaciones como s.
V	Velocidad de transmisión de la onda en m s ⁻¹ .

ρ	Densidad en kg m^{-3} .
f	Frecuencia natural de vibración de la pieza en Hz.
NCS	Sección nominal transversal de una pieza o Nominal Cross Section en inglés.
CH	Contenido de humedad de una pieza de madera en %.
LM	Método lineal de medición de sección transversal o Linear method en inglés. Detalle en apartado 3.4.4 "Estimación de la densidad".
ECM	Método de testa a centro de medición de la sección transversal o End-to-Centre Method en inglés. Detalle en apartado 3.4.4 "Estimación de la densidad".
CEM	Método de centro a testa de medición de la sección transversal o Centre-to-End Method en inglés. Detalle en apartado 3.4.4 "Estimación de la densidad".
MOE_{sta}	Módulo de elasticidad en flexión en N mm^{-2} . En inglés Modulus of Elasticity.
ANOVA	Análisis estadístico de la varianza de una muestra.
tL	Tiempo de retardo de la onda o TimeLag.
V₀	Velocidad de onda de testa a testa en m s^{-1} .
V_{se} / V_{se,glo}	Velocidad de onda superficial de canto y superficial de canto global en m s^{-1} , respectivamente.
V_{cf} / V_{cf,glo}	Velocidad de onda superficial cruzada de cara y cruzada de cara global en m s^{-1} , respectivamente.
StE	Error estándar del estimador.

RESUMEN

El objetivo principal de esta tesis es mejorar la evaluación de las propiedades mecánicas en estructuras de madera existentes *in-situ*, a través de la consideración de diferentes objetivos específicos. Se utiliza como material de ensayo un conjunto de 21 pares de madera y 4 piezas adicionales obtenidas de la cubierta del Teatro Real Carlos III de Aranjuez, Madrid. Las dimensiones nominales de las piezas son de 150 x 200 mm² de sección transversal y hasta 11 m de longitud.

En primer lugar, se investiga la influencia de la variabilidad geométrica de la sección transversal en la estimación del módulo de elasticidad, resistencia y densidad de la madera. Se analiza la variación de estas propiedades en función de la posición en el árbol y su localización en la estructura en obra.

En segundo lugar, se estudia el efecto de la distancia entre los sensores en las mediciones acústicas utilizando equipos comunes de ultrasonidos y ondas de impacto. Se busca encontrar un equilibrio entre el número de mediciones y la precisión de los modelos de predicción, tanto para las mediciones acústicas como para la estimación de la densidad, con el objetivo de reducir costos y mejorar los resultados.

Además, se examina la viabilidad del método de vibración longitudinal en estructuras existentes, comparando diferentes métodos geométricos y evaluándolos en comparación con la clasificación visual aplicada a madera de edificios históricos según la normativa actual para madera aserrada nueva.

Por último, se realiza el estudio de un caso práctico aplicando los procedimientos desarrollados en la presente tesis en un edificio histórico y se propone un esquema abreviado para estimar las propiedades físico-mecánicas en estructuras de madera *in-situ*.

Los resultados de esta investigación contribuyen al conocimiento y la mejora de la evaluación de estructuras de madera en el contexto histórico y patrimonial.

ABSTRACT

The main objective of this thesis is to enhance the assessment of mechanical properties in existing *in-situ* timber structures by considering specific objectives. A batch of 21 rafters of timber and 4 additional pieces obtained from the roof of the Royal Theatre Carlos III in Aranjuez, Madrid, are used as test material. The nominal dimensions of the pieces are 150 x 200 mm² in cross-section and up to 11 m in length.

Firstly, the influence of geometric variability in the cross-section is investigated to estimate the modulus of elasticity, strength, and density of the timber. The variation of these properties is analysed based on the position within the tree and their location within the structure *in-situ*.

Secondly, the effect of sensor distance in acoustic measurements using commonly used ultrasonic and impact wave devices is studied. The aim is to find a balance between the number of measurements and the accuracy of prediction models for acoustic measurements and density estimation, with the objective of reducing costs and improving results.

Additionally, the viability of the longitudinal vibration method in existing structures is examined by comparing different geometric methods and evaluating them in relation to visual strength grading applied to timber in historical buildings according to current regulations for new sawn timber.

Finally, a practical case study is conducted by applying the developed procedures in this thesis to a historical building, and an abbreviated framework for estimating physical-mechanical properties in *in-situ* timber structures is proposed.

The outcomes of this research contribute to the knowledge and improvement of the evaluation of timber structures within the historical and heritage context.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Estudios previos generales

En las últimas décadas, se han realizado una gran cantidad de investigaciones y trabajos con el fin de generar una normalización de los procedimientos de evaluación de estructuras de madera en edificios existentes. En este contexto, se han desarrollado diversas pautas y protocolos que abordan la evaluación *in-situ* de las estructuras de madera procedentes del patrimonio histórico. Un ejemplo es el trabajo desarrollado por Cruz et al. (2015) donde los autores detallaron un procedimiento con tres partes diferenciadas: a) una evaluación preliminar; b) una revisión detallada de los elementos de madera estructural; y c) una revisión detallada de las uniones entre los elementos estructurales. El citado trabajo, originado en la acción COST IE0601 "Wood Science for Conservation of Cultural Heritage" (WoodCultHer, 2007-2008) dio lugar a la norma europea EN 17121 (2017) "Conservation of cultural heritage – Historic timber structures – Guidelines for the on site assessment of load-bearing timber structures" en español "Conservación del patrimonio cultural – Estructuras históricas de madera – Protocolo para la evaluación *in-situ* de la capacidad de carga en estructuras de madera".

La evaluación de estructuras de madera existentes es un tema de creciente interés en Europa, donde se han establecido redes de investigación específicas en los últimos años. Una de estas redes fue la acción Cost E55 "Modelling of the Performance of Timber Structures" (2006 – 2011) en español "Modelización del comportamiento de estructuras de madera" (web: <http://www.cost-e55.ethz.ch>). Esta red ha concentrado diversas técnicas de evaluación de estructuras de madera y ha publicado los resultados en una guía titulada "Assessment of Timber Structures" (Dietsch & Köhler, 2010), en español "Evaluación de estructuras de madera". Entre sus conclusiones, se resalta que, aunque existen métodos para obtener los parámetros de rigidez de la madera, hay muy pocos métodos para determinar los parámetros de resistencia. Se resalta la necesidad de contar con métodos más fiables para obtener la resistencia de la madera, ya que algunos métodos son más limitados para este propósito. Adicionalmente, se señala la existencia de correlación entre la resistencia a la flexión y la rigidez de la madera, y se menciona que esta correlación es baja para casos habituales de roturas de tipo frágil, como, por ejemplo, la tracción perpendicular a las fibras y la rotura por cortante. Sin embargo, indican que este tipo de fallo de las piezas no es tan común en estructuras procedentes de edificios existentes con elementos de madera maciza,

ya que ocurre con mayor frecuencia en estructuras de madera laminada encolada más recientes (Dietsch & Kreuzinger, 2011).

Otra red de investigación europea relevante en este campo fue la acción Cost FP1101 "Assessment, Reinforcement and Monitoring of Timber Structures" (2011 - 2015), en español "Evaluación, refuerzo y monitorización de estructuras de madera" (web: <https://www.cost.eu/actions/FP1101/>). El objetivo principal de esta red es mejorar los métodos de evaluación, durabilidad, refuerzo y monitorización para garantizar la seguridad, estabilidad y preservación a largo plazo de las estructuras de madera, especialmente en el contexto de edificios históricos y del patrimonio cultural (J. S. Machado et al., 2015). A través de proyectos de investigación, intercambio de conocimientos y publicaciones científicas, esta iniciativa contribuye al avance de las prácticas de conservación y gestión de estructuras de madera, promoviendo así la preservación del patrimonio cultural y la sostenibilidad en la industria de la construcción.

Dentro del campo de la evaluación de estructuras de madera se han desarrollado numerosas técnicas no destructivas que permiten monitorizar y evaluar propiedades físicas y mecánicas de los elementos estructurales. Estas técnicas no dañan las piezas o estructuras evaluadas y pueden ser portátiles, instalables *in-situ* para monitorizar o equipos más pesados. Las técnicas no destructivas son herramientas fundamentales cuyo estudio incrementa el conocimiento de este material y permite obtener información precisa sobre las características internas o externas de la madera. Entre los parámetros más comunes que se pueden obtener a través de estas técnicas están: la densidad, el contenido de humedad, el módulo de elasticidad, la resistencia, la degradación por diferentes agentes externos. Varios autores han llevado a cabo un estudio del estado del arte de las técnicas no destructivas más comunes (Llana, Íñiguez-González, Díez, et al., 2020; Ross, 2015; Vössing & Niederleithinger, 2018).

1.2 Estudios referentes a la variación de la sección

La mayoría de los estudios que emplean técnicas no destructivas para la estimación de las propiedades físico-mecánicas se centran en madera aserrada nueva o en muestras de tamaño reducido y muchas veces libres de defectos. Este procedimiento permite obtener conclusiones más claras al poder limitar la variabilidad que producirían otros factores. Sin embargo, en los últimos años, varios autores han publicado investigaciones sobre material procedente de estructuras existentes con dimensiones grandes y con los defectos e irregularidades que son comunes en estas piezas. Estos trabajos enfocan la evaluación de edificios *in-situ*

tradicionales con la utilización de diversos métodos no destructivos como los métodos acústicos (ultrasonidos u ondas de impacto), vibración, mecánicos (extracción de virutas, arranque de tornillo, etc.) o la clasificación visual, entre otros para determinar las propiedades físico-mecánicas de elementos estructurales de madera procedentes de edificios existentes (Arriaga et al., 2005, 2007; Esteban, Arriaga, et al., 2010; Íñiguez-González et al., 2015; Osuna-Sequera, Llana, et al., 2019; Riggio et al., 2017; Sousa & Neves, 2018; Tannert et al., 2010). El desarrollo e investigación con técnicas no destructivas ha dado lugar a nuevos equipos portátiles y metodologías con buenos resultados y nuevas líneas de investigación. Como resultado, es posible estimar con precisión parámetros relevantes como la densidad, el módulo de elasticidad y los valores de resistencia, utilizando modelos estadísticos de predicción procedentes de diversos trabajos de investigación para diferentes especies. Estos modelos permiten verificar de manera fiable los elementos procedentes de estructuras existentes para estimar su capacidad de carga o identificar daños bióticos o estructurales (Anagnostopoulou & Pournou, 2013; Calderoni et al., 2010; Feio & Machado, 2015; Machado & Palma, 2011; Sousa et al., 2012).

El estudio de piezas de madera procedentes de edificios existentes frecuentemente revela una gran variabilidad en las medidas de la sección transversal de referencia (reference cross-section en inglés o RCS) a lo largo de la longitud de la pieza lo cual es un parámetro importante para la clasificación visual y el comportamiento mecánico de las piezas (Morales-Conde & Machado, 2017; Stapel & van de Kuilen, 2014; UNI, 2004). Entre los factores que pueden causar la variación geométrica de la sección transversal a lo largo de la pieza está la degradación biótica (termitas, hongos, carcomas, etc.) o irregularidades en el aserrado de las piezas originales (como las gemas) y puede tener influencia en la estimación de las propiedades mecánicas (Brites et al., 2013; Sousa et al., 2014). Por lo tanto, la metodología de medición de la sección transversal puede tener una influencia relevante en la precisión de los modelos de estimación. Lourenço et al. (2013) propuso un modelo predictivo y un valor constante para la pérdida de sección transversal provocada por hongos de pudrición en especies de coníferas en piezas procedentes de estructuras existentes. Este modelo se utilizó para definir curvas de deterioro a lo largo del tiempo, lo que resulta en un índice de fiabilidad de predicción dependiente del ciclo de vida de los elementos estructurales. Las piezas antiguas dentro de un mismo local presentan variaciones en las dimensiones de la sección transversal a lo largo de la pieza y entre piezas. Íñiguez-González et al. (2019) observaron que el coeficiente de variación (coefficient of variation en inglés o CoV) de las dimensiones de la sección transversal presentaba hasta diferencias de hasta 4 o 5 veces comparando piezas antiguas y nuevas. Referente a las propiedades mecánicas,

Sousa et al. (2014) mostraron una reducción del 5 % en el módulo de elasticidad dinámico y estático y hasta un 30 % de reducción en la resistencia a compresión paralela a la fibra entre madera deteriorada por hongos y madera sana en 20 piezas de madera de *Castanea sativa* Mill. procedentes de un forjado debido a la variación de la sección transversal de las piezas y las mediciones con técnicas no destructivas. Sin embargo, las investigaciones mencionadas anteriormente analizan la influencia de la pérdida de sección transversal desde un punto de vista diferente al de la presente tesis. Nevado et al. y la tesis de Nevado (M. Á. Nevado, 2015; M. A. R. Nevado et al., 2015) utilizan un enfoque más cercano al de los trabajos de investigación sobre la fiabilidad estructural y su relación con la variabilidad de la sección.

1.3 Estudios referentes al efecto de la longitud

En la evaluación *in-situ* existen algunas dificultades, ya que, a menudo es complicado o incluso imposible acceder a todas las superficies de las piezas. Por lo tanto, resulta interesante estudiar la precisión de la estimación de las propiedades mecánicas utilizando diferentes métodos de medición para la evaluación *in-situ*. Existen diversos factores que influyen en la velocidad de transmisión de onda obtenida con métodos acústicos, como la temperatura, el contenido de humedad, las dimensiones de la pieza, los procedimientos empleados y los equipos no destructivos utilizados (Arriaga et al., 2017, 2019; Íñiguez-González et al., 2015; Llana, Íñiguez-González, Esteban, et al., 2020; Llana, Íñiguez-González, Martínez, et al., 2018; Wang, 2013).

Como se ha mencionado, las dimensiones de la pieza afectan a las mediciones de la velocidad de transmisión de onda debido a la longitud y la sección transversal de la pieza. La determinación de las dimensiones de las piezas y su influencia en las mediciones debe tenerse en cuenta al planificar las áreas de muestreo en la evaluación *in-situ* de estructuras de madera existentes. Varios autores ya han estudiado estos efectos: con parámetros de ancho/canto (canto o altura de la sección) de la pieza (Bucur, 1984), longitud de la pieza/longitud de onda (Bartholomeu et al., 2003; Oliveira et al., 2006), frecuencia (Trinca & Gonçalves, 2009), tamaño de la sección transversal (Divos et al., 2005), longitud (Arriaga et al., 2006; Íñiguez-González, 2007) y presencia de nudosidad (Íñiguez-González et al., 2007). Entre los resultados de estos trabajos los autores han realizado recomendaciones para diferentes especies y dimensiones de las piezas. En los trabajos de investigación mencionados anteriormente, las piezas que se midieron variaban ampliamente en longitud y sección transversal, desde menos de 1 m en el laboratorio hasta varios metros en edificios existentes. En piezas de unas determinadas dimensiones, al

configurar los sensores (emisor y receptor) en las testas (o método directo) la distancia máxima entre las testas coincide con la de los sensores pudiendo estudiar el efecto de la longitud en función de la longitud de la propia pieza. Se puede hacer un estudio del efecto de la longitud seccionando sucesivamente la pieza y realizando mediciones directas, de lo contrario sólo se tendría una medición y no se podría comparar con otras longitudes a no ser que se trataran de piezas diferentes. Por otro lado, otros trabajos emplean diferentes configuraciones de sensores sin necesidad de seccionar la pieza y considerando la longitud de medición la distancia entre los sensores para el estudio del efecto de la longitud, colocándolos sobre las caras de la pieza y con diferentes trayectorias del camino recorrido (Arriaga et al., 2017, 2019; Casado et al., 2005; Machado et al., 2009; Stangerlin et al., 2017; Teder et al., 2012). Sin embargo, se ha prestado menos atención al efecto de la distancia entre los sensores en la estimación de propiedades mecánicas.

Durante la evaluación de una estructura procedente de un edificio existente, sus elementos estructurales varían en longitud y sección transversal. También en muchos casos las mediciones en obra se han hecho sobre distancias cortas por razones de comodidad o por dificultades de acceso a la pieza. Estas diferencias entre los diversos procedimientos encontrados dan lugar a resultados ligeramente diferentes. Teniendo esto en cuenta, con un mayor conocimiento del efecto de la distancia entre sensores, sería posible estimar mejor las propiedades mecánicas independientemente de la longitud o sección de las piezas. Además, es esencial conocer la influencia de este efecto para poder comparar los resultados de diferentes estudios.

1.4 Estudios referentes a la densidad

Las diversas singularidades que pueden encontrarse en la madera tienen una influencia relevante en sus propiedades mecánicas. Entre las diferentes singularidades se incluyen nudos, desviación de la fibra, gemas, fendas, entre otros (Ross, 2010). Adicionalmente, se ha demostrado que el parámetro de la densidad o la tasa de crecimiento en la madera son buenos indicadores de la calidad de esta y, por tanto, de las propiedades mecánicas de la madera (Ceccotti & Togni, 1996; Iñiguez-Gonzalez et al., 2015; López et al., 2013). La combinación de parámetros obtenidos a través de técnicas no destructivas y la densidad en modelos de predicción aumenta considerablemente la precisión del modelo al estimar las propiedades mecánicas (Iñiguez-González, 2007; Iñiguez-González et al., 2010; Llana, 2016; Martínez et al., 2018). Por lo tanto, es de suma importancia obtener una lectura precisa de la densidad de los elementos estructurales estudiados, lo cual supone un desafío en piezas procedentes de estructuras existentes. A continuación,

se muestran las principales herramientas empleadas en el presente trabajo para estimar la densidad *in-situ*, comúnmente empleadas en la evaluación de edificios o piezas de madera:

Los equipos no destructivos de resistencia a la penetración (Needle Penetration Resistance en inglés o NPR) se han utilizado para estimar la densidad, utilizando el Pilodyn 6J Forest (Proceq, Schwerzenbach, Suiza) y el WoodPecker (DRC, Ancona, Italia). El Pilodyn 6J Forest, en concreto, se ha utilizado ampliamente desde la década de 1980 para estimar la densidad. Hoffmeyer (1978) presentó varios ensayos realizados por dos universidades danesas (College of Forestry of the Royal Veterinary and Agricultural University y el Building Materials Laboratory of the Technical University de Dinamarca) en un intento de evaluar el Pilodyn como un equipo para la medición de la densidad para madera aserrada. Se concluyó que el Pilodyn se puede utilizar con éxito para evaluar la densidad de la madera con valores del coeficiente de determinación o r^2 entre 48 % y 84 % en píceas de Noruega (*Picea abies* (L.) Karst.), pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.), haya europea (*Fagus sylvatica* L.) y otras especies. Otros autores como Lourenço et al. (2007) utilizaron el Pilodyn 6J Forest en piezas de castaño (*Castanea sativa* Mill.) de 50 x 50 x 100 mm³, haciendo una regresión lineal entre la densidad y la profundidad de penetración obteniendo un $r^2 = 77$ % y $r^2 = 79$ % con muestras de castaño antiguas y nuevas, respectivamente. Por otro lado, Faggiano y Marzo (2015) obtuvieron un $r^2 = 68$ % con muestras antiguas de pequeñas dimensiones de castaño, llevando a cabo regresiones lineales entre la densidad, la profundidad de penetración y los parámetros obtenidos con un resistógrafo. A continuación, los siguientes trabajos de investigación se centraron en piezas de madera de gran escuadría: los resultados de mediciones puntuales en 395 piezas aserradas de pino radiata, pino silvestre y pino laricio de procedencia española mostraron r^2 entre 49 % y 50 % en la estimación de la densidad con modelos de regresión lineales (Bobadilla et al., 2007). Montón (2012) utilizó el Pilodyn 6J (PIL) para la estimación de la densidad en pino radiata (*Pinus radiata* D. Don), obteniendo $r^2 = 31$ %. Íñiguez-González et al. (2010) obtuvieron un $r^2 = 61$ % en el modelo de estimación de la densidad sobre 266 piezas de tamaño estructural de cuatro especies diferentes de origen español: pino radiata, pino silvestre, pino laricio (*Pinus nigra* Arnold ssp. *salzmannii* (Dunal) Franco) y pino resinero (*Pinus pinaster* Ait.). Montero (2013) obtuvo un $r^2 = 34$ % con 218 piezas de pino silvestre (origen español) como material de ensayo con dimensiones nominales de 150 x 200 mm² y una longitud de 4 m y un $r^2 = 21$ % en 26 piezas de pino silvestre de 100 x 150 mm² con una longitud de 3 m. Llana (2016) alcanzó un $r^2 = 56$ % en el modelo de predicción de densidad empleando 120 piezas de madera de pino radiata, pino silvestre, pino laricio y pino resinero de 90 x 140 mm² y una longitud de 4 m de diferentes procedencias españolas.

Por otro lado, los trabajos de investigación que han utilizado el equipo de penetración WoodPecker (WP) son escasos y más recientes. Se obtuvo un valor de $r^2 = 75 \%$ con el WP penetrando la aguja con tres impactos en probetas libres de defectos de pequeñas dimensiones de álamo negro de Norteamérica (*Populus deltoides* W.Bartram ex Marshall.), roble europeo (*Quercus robur* L.), iroko (*Milicia excelsa* Welw.), missanda (*Erythrophleum ivorense* A. Chev.), castaño, cedro rojo occidental (*Thuja plicata* Donn ex D.Don), pino radiata, pino silvestre, pino laricio y pino resinero (Salamanca, 2017). La investigación llevada a cabo por los autores Llana et al. (2018) mostró un $r^2 = 28 \%$ (también con tres impactos de aguja) en madera estructural de picea de Noruega de un edificio del siglo XIX.

La máquina de arranque de tornillos (MAT) (Screw Withdrawal Resistance Meter en inglés o SWRM) (Fakopp, Sopron, Hungría) se ha utilizado en varios estudios para estimar la densidad de la madera. Bobadilla et al. (2007) propusieron tres modelos de estimación de densidad, donde mostraron un $r^2 = 48 \%$, 50% y 50% , respectivamente. El material de ensayo consistió en 395 piezas aserradas de pino radiata, pino silvestre y pino laricio de origen español con secciones transversales de $150 \times 200 \text{ mm}^2$, $150 \times 250 \text{ mm}^2$ y $200 \times 250 \text{ mm}^2$. Se han llevado a cabo otros trabajos de investigación utilizando el SWRM, obteniendo un $r^2 = 67 \%$ con 266 piezas estructurales de pino radiata, pino silvestre, pino laricio y pino resinero (Íñiguez-González et al., 2010). La investigación de Casado et al. (2012) mostró un $r^2 = 76 \%$ en su modelo para estimar la densidad empleando 338 piezas estructurales de madera de álamo negro (*Populus x euramericana* Moench, "I-214") con secciones transversales de $50 \times 150 \text{ mm}^2$, $80 \times 150 \text{ mm}^2$ y $100 \times 200 \text{ mm}^2$ y longitudes entre 2.500 y 4.000 metros. Íñiguez-González et al. (2015) obtuvieron una regresión lineal entre SWRM y la densidad con un $r^2 = 57 \%$, utilizando como material de ensayo piezas de pino radiata con dimensiones $80 \times 120 \times 2.500 \text{ mm}^3$. Llana (2016) obtuvo un $r^2 = 68 \%$ empleando 120 piezas de madera de pino radiata, pino silvestre, pino laricio y pino resinero de diferentes procedencias españolas, con dimensiones $90 \times 140 \times 4.000 \text{ mm}^3$.

Recientemente se ha desarrollado un dispositivo de extracción de virutas, el Wood Extractor en inglés o WoodEx (Martínez, 2016) (Timber Construction Research Group, GICM-UPM, Madrid, España). Un estudio llevó a cabo el análisis de la extracción de virutas con WoodEx para estimar la densidad en 174 probetas de madera de $60 \times 90 \times 150 \text{ mm}^3$ de cuatro especies de procedencia española (pino radiata, pino silvestre, pino laricio y pino resinero) (Martínez et al., 2018). Se mostraron regresiones lineales entre la densidad y la densidad de la extracción de virutas ($r^2 = 81 \%$) y la masa de las virutas ($r^2 = 84 \%$).

El número de mediciones mediante técnicas no destructivas en la evaluación de estructuras de madera existentes es una variable importante, ya que afecta a la calidad de la predicción de la densidad, así como el coste económico de la evaluación de una estructura. El coeficiente de correlación mejora con el número de mediciones (Görlacher, 1987). En este trabajo de investigación, se utilizaron 30 probetas de abeto de Noruega (*Picea abies* L. Karst) con 45 cm de longitud y secciones transversales de 11 a 21 x 33 a 36 mm², con 16 mediciones de profundidad de penetración utilizando el PIL en cada pieza. El r² fue del 41 % para una medición y aumentó hasta el 83 % con 16 mediciones.

1.5 Predicción con métodos visuales

La clasificación visual (en inglés Visual Strength Grading o VSG) se utiliza habitualmente para establecer una clase resistente en piezas de madera según la especie y sus propiedades físico-mecánicas. Las normativas de clasificación visual están destinadas para su uso en piezas producidas en aserraderos, con el fin de clasificarlas en grupos denominados clases resistentes con diferentes propiedades mecánicas. En este proceso, siempre se rechaza una parte del material para uso estructural porque no cumple con los requisitos exigidos por la normativa dentro de los parámetros que valora. En el trabajo llevado a cabo por Cruz et al. (2015) señalan desde un punto de vista práctico referente a la conservación del patrimonio que el objetivo principal al evaluar la resistencia de una estructura de madera debería ser conservar la mayor cantidad posible del material original. Las normativas de clasificación visual actuales para madera recién aserrada son inadecuadas por varios motivos, entre los cuales se pueden destacar los siguientes: las dimensiones de la sección transversal suelen ser mucho mayores que las utilizadas actualmente, la fiabilidad de aplicar las normas actuales a madera procedente de edificios históricos no se ha verificado adecuadamente y algunos defectos como la deformación y las fendas, que suelen ser mayores habitualmente en maderas de gran sección, apenas afectan las propiedades mecánicas.

En la aplicación de la clasificación visual en piezas procedentes de estructuras antiguas pueden surgir algunos inconvenientes. En primer lugar, el resultado más frecuente es que las piezas de un mismo lote sean asignadas a diferentes calidades visuales o incluso se rechacen. Normalmente, si se aplican todos los criterios completos recogidos en la norma de clasificación, el porcentaje de rechazo será demasiado alto. Sin embargo, no es posible descartar las piezas clasificadas como rechazo en una estructura existente, ni tendría sentido hacerlo. Diversos autores han recogido resultados que verifican estos inconvenientes, por ejemplo, se llevó a cabo

una clasificación visual en 85 piezas de madera de coníferas procedentes de edificios con 100-150 años de antigüedad según la norma española UNE 56544 (2011) y la norma alemana DIN 4074-1 (2012), y los porcentajes de rechazo fueron del 52 % y 41 %, respectivamente (Arriaga et al., 2005). Loebjinski et al. (2019) realizaron un estudio con 19 piezas de madera de pino y roble antiguas procedentes de cuatro cerchas de un edificio histórico (siglos XV-XVI) que se clasificaron visualmente según la norma alemana DIN 4074-1 (2012), y se les asignó su clase de resistencia según la norma europea EN 1912 (2012). Después de los ensayos mecánicos, los resultados mostraron que la clasificación visual subestima la capacidad de carga. El uso de mediciones de velocidad ultrasónica permitió mejorar la predicción de tal manera que el 90 % de las piezas se asignaron a sus clases de resistencia óptimas.

En segundo lugar, durante la evaluación de estructuras no siempre es posible acceder a las cuatro caras de una pieza (normalmente es posible acceder a tres caras, aunque a veces están completamente ocultas por el montaje en obra). La clasificación visual, por lo tanto, es imposible o incompleta. Además, algunas de las singularidades de las piezas de madera (defectos) consideradas en la clasificación visual tienen poca relevancia en el caso de las estructuras existentes. Por ejemplo, las fendas, que son más frecuentes en piezas de gran sección transversal, no implican una pérdida significativa de capacidad de carga, como lo demuestran varios documentos de investigación mostrados a continuación.

Rammer (1999) determinó la resistencia al cortante en 35 piezas de abeto de Douglas con una sección transversal de $152 \times 365 \text{ mm}^2$ y 34 piezas de $254 \times 457 \text{ mm}^2$ recicladas procedentes de una instalación militar. Ambos tipos de piezas se dividieron en dos categorías, una de ellas con poca evidencia visual de fendas y la otra con fendas significativas en la dirección longitudinal. Los resultados mostraron que la resistencia al cortante de la segunda categoría era menor que la de la primera. Sin embargo, no se utilizó el mismo método de ensayo para ambas categorías. Se utilizó un ensayo a flexión en 5 puntos (3 apoyos y cargas concentradas en cada vano) para las piezas sin fendas con el fin de obtener los valores máximos de rotura por cortante; y se utilizó una prueba de flexión de 4 puntos (2 apoyos y 2 cargas concentradas) para las piezas con fendas para simular la situación normal de vigas con fuerzas de cortante más altas cerca de los apoyos. El hecho de haber utilizado métodos diferentes puede haber influido en los resultados. Falk et al. (2000) estudiaron la influencia de las fendas en la resistencia a la compresión de 60 pilares de abeto de Douglas de 3 m de longitud y sección transversal de $190 \times 190 \text{ mm}^2$. Las piezas de ensayo se dividieron en dos grupos, 30 piezas con presencia de fendas y 30 sin fendas, y se sometieron a ensayos de compresión hasta la rotura. El valor medio de la resistencia a la compresión fue el mismo, lo que llevó a la conclusión

esperada de que no había una diferencia consistente entre la resistencia a la compresión de los pilares con fendas y sin fendas.

En otro trabajo de investigación, Esteban et al. (2010) analizaron el efecto de las fendas en 28 piezas de pino silvestre de sección transversal de 100 x 120 mm² y 100 x 150 mm² procedentes de un edificio del siglo XVIII. Las piezas se clasificaron en tres grupos según el tamaño de las fendas (grandes, medianas y pequeñas). Se sometieron a ensayos de flexión de luz corta (con un ratio luz-canto igual a 5) para obtener el fallo por cortante. No se encontraron diferencias estadísticamente significativas en función del tamaño de las fendas, la capacidad de carga y la rigidez.

De manera similar, el efecto de las gemas, que también son muy frecuentes en piezas antiguas y de gran sección transversal, generalmente se considera simplemente una pérdida de área de la sección transversal, sin reducir la resistencia. Sin embargo, hay un efecto favorable de la presencia de las gemas, ya que la continuidad de las fibras no se pierde en la superficie de la gema. Esto es contrario a lo que ocurre en las superficies en madera aserrada con un corte plano; de esta manera la pérdida de área de la sección transversal queda compensada por el efecto favorable de la gema. La madera de rollizo se puede considerar como el caso extremo de gemas en la madera aserrada, y se ha analizado tanto de forma teórica como experimental. La variabilidad en la resistencia para la madera de rollizo se sitúa alrededor de ½ a ⅔ de la variabilidad correspondiente en la madera aserrada; esto se debe a la continuidad superficial de las fibras en la madera, y esta menor variabilidad implica valores de resistencia característicos más altos (Wolfe, 2000; Wolfe & Murphy, 2005).

Arriaga et al. (2007) estudiaron el efecto de las gemas en 84 piezas de madera de pino silvestre y de pino resinero procedentes de estructuras existentes con secciones transversales que variaban entre 100 x 115 mm² y 140 x 195 mm². Se sometieron a ensayos de flexión y se clasificaron en tres grupos según el tamaño de la gema (sin presencia de gemas, gemas medianas y gemas grandes). Las pruebas mecánicas mostraron que la resistencia a la flexión de las piezas con gemas no era inferior a la resistencia de las piezas sin gemas. En otro trabajo de investigación, Esteban et al. (2010) realizaron ensayos utilizando dos lotes de piezas de pino silvestre del mismo origen para determinar el efecto de las gemas en la resistencia a la flexión. El primer grupo de piezas estaba constituido por 116 piezas de madera aserrada de sección transversal de 150 x 200 mm², y el segundo grupo consistió en 102 piezas de madera de 150 mm de ancho aserradas para obtener una gema completa en uno de sus bordes y una altura de la sección (canto) promedio de 215 mm. El 50 % de las piezas con gemas se situaron durante el ensayo de flexión con el borde de la gema en el lado de compresión, mientras que el otro 50 % se situó en el lado de tracción. Al

comparar estos resultados con los de las piezas sin gemas, se concluyó que, una gema en el lado de compresión produce una reducción de la resistencia a la flexión, pero no cuando está en el lado traccionado.

Vestol et al. (2010) estudiaron el efecto de las gemas en 125 vigas de pino silvestre con secciones transversales cuadradas de 75 x 75 a 225 x 225 mm², y un patrón de aserrado para obtener una gema en el tercio central de la pieza. Concluyeron que las gemas reducen la capacidad de momento flector, aunque el efecto es menor de lo que se esperaría por la pérdida de la sección transversal equivalente. El efecto también es menos importante que el de la densidad y el diámetro de los nudos. En el caso del módulo de elasticidad, hubo menos diferencia entre los resultados de los ensayos y lo que se esperaba debido a la pérdida de sección transversal. Los autores explican la causa de este comportamiento por dos razones principales: las fibras continuas en la superficie que no están rotas en las gemas y esto aumentan la resistencia de la viga; y, en segundo lugar, la proporción de madera juvenil disminuye con el aumento de la presencia de las gemas; la madera madura es más densa, más resistente y rígida que la madera juvenil. También realizaron ensayos de flexión en 124 rollizos de la misma especie y origen para comparar sus resultados con los de las piezas cuadradas con gemas en el tercio central, concluyendo que había una diferencia significativa en la resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad.

Los defectos más relevantes en la clasificación visual son los nudos y la desviación de la fibra. Algunos estudios experimentales proponen hacer la clasificación visual basándose únicamente en estos dos parámetros (Arriaga et al., 2005). Por otro lado, la cantidad de nudos se puede tener en cuenta de manera simplificada utilizando el concepto de "relación de diámetro de nudo" (Knot Diameter Ratio en inglés o KDR) y "relación de diámetro de nudo concentrado" (Concentrated Knot Diameter Ratio en inglés o CKDR). El primero es el diámetro del nudo dividido por el canto (o altura) o ancho de la sección de la pieza según la norma japonesa SIS-19 (1991), y el segundo es la suma de las KDR de todos los nudos dentro de cualquier longitud de 15 cm de una pieza (EN 844-9, 2020; Divos & Tanaka, 1997). El CKDR máximo observado en las cuatro caras es un criterio de calidad de la pieza.

La norma de clasificación italiana UNI 11119 (2004) es probablemente la única que incluye específicamente un procedimiento para la clasificación visual de madera en estructuras existentes. Propone un sistema de clasificación con tres categorías (I, II y III) y sus principales parámetros de clasificación son los nudos, la dirección de la fibra, las gemas y las fendas. El efecto de las gemas se limita a la pérdida de área de la sección transversal, y se permiten fendas siempre que no atraviesen

completamente la pieza. Esta norma también tiene las desventajas mencionadas anteriormente en su aplicación a estructuras existentes, pero al menos incluye observaciones y recomendaciones específicas para este propósito, como las descritas a continuación. Propone la clasificación a lo largo de toda la longitud de una pieza, pero indica que debe ser extremadamente estricta en las llamadas zonas "críticas". Estas zonas se definen como secciones de una pieza con una longitud mayor o igual a 15 cm que tienen defectos importantes, o cuando su posición coincide con la solicitación máxima, o cuando están muy deterioradas. Diodato et al. (2015) aplicaron la norma italiana para llevar a cabo la evaluación de forjados de rollizos con revoltón del siglo XVIII al XX en la Comunidad Valenciana, España. Mencionan la falta de regulaciones o normativas para la evaluación de estructuras de madera existentes, encontrando que ninguna pieza fue rechazada y un bajo porcentaje (del 8 % al 38 %) de piezas de categoría menor utilizando la norma italiana UNI 11119 (2004).

La correlación entre las singularidades de la madera (nudos, desviación de la fibra, fendas y gemas) y las propiedades mecánicas puede clasificarse de baja a media (r^2 del 20 % al 80 %), dependiendo de si se utiliza para predecir la resistencia o la rigidez (Feio & Machado, 2015). Esta clasificación fue propuesta por el Comité Conjunto de Seguridad Estructural (Joint Committee on Structural Safety) (1997), muy alta si $r^2 > 80$ %; alta si 80 % $\leq r^2 < 60$ %; media si 60 % $\leq r^2 < 40$ %; de baja a media si 40 % $\leq r^2 < 20$ %; y muy baja si $r^2 \leq 20$ %. En resumen, aunque la clasificación visual de la madera en estructuras existentes puede ayudar a estimar sus propiedades mecánicas, no debe utilizarse de forma directa. El objetivo no es rechazar las piezas, sino determinar su capacidad de carga. Por lo tanto, las técnicas no destructivas pueden ser utilizadas como una herramienta efectiva.

1.6 Predicción con métodos acústicos

Adicionalmente, en los últimos años, son muchos los trabajos de investigación que han combinado la clasificación visual y las técnicas no destructivas con resultados positivos, como ondas de impacto, ultrasonidos, vibración o ensayos puntuales, para determinar las propiedades físicas y mecánicas de piezas de madera procedentes de edificios existentes (Arriaga et al., 2005, 2007; Esteban, Arriaga, et al., 2010; Íñiguez-González et al., 2015; Osuna-Sequera, Llana, et al., 2019; Riggio et al., 2017; Sousa & Neves, 2018; Tannert et al., 2010). Una manera de obtener el MOE_{dyn} es mediante la determinación de la velocidad de onda de impacto, y la densidad de la pieza. Actualmente se utilizan numerosos métodos para medir la velocidad de transmisión de onda, incluyendo vibración longitudinal y métodos acústicos como los ultrasonidos y ondas de impacto. A continuación, se muestran

algunos trabajos llevados a cabo por varios autores. Cavalli et al. (2016) mostraron valores obtenidos con modelos estadísticos del módulo de elasticidad estático a través del módulo de elasticidad dinámico y las gemas con $r^2 = 70 \%$ y la resistencia a la rotura con $r^2 = 43 \%$ en 81 piezas de abeto noruego (*Picea abies* (L.) Karst.) y abeto blanco (*Abies alba* Mill.) procedentes de estructuras existentes. Además, se emplearon en conjunto la clasificación visual y las técnicas no destructivas en dos armaduras de un edificio existente para identificar sus secciones débiles de forma efectiva ('Historical Earthquake-Resistant Timber Frames in the Mediterranean Area', 2015). Esto simplificó el uso de refuerzos estructurales, que, además se pudieron instalar de una manera más precisa gracias a los resultados (Branco et al., 2017). Riggio et al. (2017) observaron mejoras en la estimación de propiedades físico-mecánicas utilizando técnicas no destructivas en la estructura de madera de la torre campanario de Giotto en Florencia, Italia. Por otro lado, múltiples estudios han obtenido propiedades mecánicas empleando las técnicas no destructivas acústicas. A modo de ejemplo, un trabajo de investigación mostró una regresión lineal entre el módulo de elasticidad estático y dinámico en piezas de pino radiata (*Pinus radiata* D. Don) con una sección transversal de $80 \times 120 \text{ mm}^2$, obteniendo un $r^2 = 86 \%$ - 87% ; por otro lado, otra regresión entre la resistencia a flexión y el módulo de elasticidad dinámico obtuvo un r^2 menor entre el 50% y 54% , pero aumentó la predicción del modelo al incluir el parámetro CKDR, mejorando el r^2 entre un 59% y 61% (Arriaga et al., 2014). Un estudio similar con piezas de sección transversal de abeto de Noruega con sección transversal de $76 \times 226 \text{ mm}^2$ obtuvo un $r^2 = 54 \%$ - 66% con una regresión lineal entre el módulo de elasticidad estático y dinámico; un $r^2 = 15 \%$ - 33% entre la resistencia a flexión y módulo de elasticidad dinámico; y un $r^2 = 32 \%$ - 40% entre la resistencia a flexión y el módulo de elasticidad dinámico en conjunto con el CKDR (Arriaga et al., 2019).

1.7 Predicción con vibración

Las técnicas no destructivas (non-destructive techniques en inglés o NDT) basadas en las mediciones de propagación de las ondas se han estudiado desde la década de 1960 para su aplicación en la clasificación estructural de madera (Galligan & Courteau, 1965; Pellerin, 1965). El análisis de la vibración transversal de una viga apoyada simple, resolviendo la ecuación de Timoshenko, ha llevado a una expresión para el módulo de elasticidad dinámico (MOE_{dyn}) en función de la frecuencia natural, la masa y las dimensiones de la viga (Ross, 2015). Jayne (1959) publicó uno de los primeros estudios que aplicó estas técnicas para la estimación de las propiedades mecánicas de flexión estática de probetas pequeñas de madera sin defectos, y Pellerin (1965) hizo lo mismo para la madera aserrada estructural y vigas de madera laminada encolada. La velocidad de onda puede determinarse mediante

la obtención de la frecuencia natural de vibración mediante el método de vibración longitudinal (Arriaga et al., 2012; Bucur, 2006; Osuna-Sequera et al., 2021). Estas técnicas se han aplicado tanto a madera de pequeñas dimensiones sin defectos como a piezas estructurales más grandes (Arriaga et al., 2012; J. Machado et al., 2009).

En la industria de la madera se utilizan habitualmente varios equipos para la clasificación de la madera basada en el método de vibración longitudinal que para su uso en obra son portátiles y se han utilizado en varios trabajos de investigación (Arriaga et al., 2012, 2014; Casado et al., 2010; Íñiguez-González, 2007). Algunos, como el Portable Lumber Grader (PLG) (Fakopp Enterprise, Sopron, Hungría), consta de un micrófono que registra la señal de sonido producida por un impacto de martillo. El Mobile Timber Grader (MTG) de Brookhuis MicroElectronics Company (Brookhuis Applied Technologies, Enschede, Países Bajos) utiliza un acelerómetro de contacto para medir la frecuencia natural de vibración longitudinal después de un impacto breve, y también se ha utilizado en numerosos trabajos de investigación (Baltrušaitis et al., 2009; Baltrušaitis & Aleinikovas, 2012; Burawska-Kupniewska et al., 2021; Guntekin et al., 2012, 2014; Hodoušek et al., 2016; Krzosek et al., 2021). El Strength Timber Grader (STIG) de Ilkon d.o.o. (Liubliana, Eslovenia) registra la señal con un vibrómetro láser portátil (Plos et al., 2022). Por otro lado, algunos fabricantes han desarrollado dispositivos que se pueden integrar en una línea de clasificación con una capacidad de clasificación de hasta 180 tablas por minuto utilizando un interferómetro láser para medir la vibración longitudinal (mtgEscan de Brookhuis y Viscan-Compact de Microtec (Rais et al., 2014)).

Los métodos no destructivos basados en vibración se aplican más ampliamente para la clasificación de madera nueva en el aserradero y se utilizan con menos frecuencia para evaluar estructuras de madera *in-situ*. Esto se debe a que la pieza que se va a ensayar debe estar aislada de otras piezas y elementos de construcción, ya que estos modifican su modo de vibración. Sin embargo, tienen una aplicación práctica en trabajos de restauración cuando las estructuras se desmontan y luego se vuelven a ensamblar, o cuando se reutiliza material de obras procedentes de demolición. El método de vibración longitudinal también se ha utilizado para clasificar piezas de madera de gran escuadría. Arriaga et al. (2012) midieron la frecuencia natural de vibración longitudinal en 395 piezas procedentes de estructuras (150 x 200 mm² y 200 x 250 mm² de sección transversal) de pino radiata (*Pinus radiata* D. Don), pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.) y pino laricio (*Pinus nigra* Arnold ssp. *salzmannii* (Dunal) Franco) de procedencia española, y concluyeron que existe un gran potencial para la clasificación de la resistencia en la madera de gran escuadría. Uno de los primeros trabajos de investigación sobre el uso de técnicas de vibración en madera procedente de estructuras existentes se realizó en 21 piezas grandes con una

sección transversal de 150 x 200 mm² y una longitud de 11 m (Osuna-Sequera et al., 2020). Los resultados tuvieron una mayor predicción del módulo de elasticidad en comparación con otros métodos acústicos.

1.8 Ejemplos de casos prácticos

A continuación, se presentan diversos casos prácticos donde se han empleado técnicas tradicionales de evaluación, técnicas no destructivas o la combinación de estas para la evaluación del estado de diversas estructuras de madera.

Varios autores han mostrado trabajos llevados a cabo en estructuras de cubiertas. Macchioni et al. (2018) proporcionan una descripción general de los tipos de cerchas que se utilizan en Italia y analizan brevemente el caso de una cubierta. Cuanto más esfuerzo y detalle se dedique al estudio y análisis de una estructura, mayor será la fiabilidad de la información obtenida. Un estudio deficiente puede llevar a una decisión equivocada que cause la pérdida de la estructura original. Bertolini et al. (2019) estudiaron el caso de una estructura de cubierta procedente de un edificio histórico que pudo ser rehabilitado en lugar de reemplazar la estructura. Tras la reparación, se consideró la posibilidad de hacer la cubierta visitable, lo que habría generado un nuevo valor al edificio.

Otros autores han centrado varios estudios en la inspección y el análisis de sistemas estructurales de forjados. El estudio teórico realizado por Descamps et al. (2018) propone un método de diseño adimensional que permite reducir el proceso de cálculo para hacer mucho más rápida una evaluación y de manera muy simplificada empleando esencialmente parámetros geométricos (esbeltez) para cumplir con las especificaciones de la normativa. Otro estudio trata sobre la estructura del forjado de la fortificación Skansen Lejonet ubicada en Gotemburgo, Suecia. Esta fue evaluada mediante la estimación de la resistencia y la rigidez utilizando métodos de ensayo no destructivos (ondas de impacto, inspección visual, resistografía y rayos X) con un protocolo detallado (Lechner et al., 2014). Emplearon mediciones paso a paso (en tramos cortos) para detectar las áreas más sensibles a lo largo de las viguetas.

Adicionalmente, el artículo desarrollado por Negrão et al. (2020) contiene un análisis numérico de los resultados de una prueba de carga para forjados en piezas de madera de castaño con una sección transversal de 94 x 202 mm, espaciadas entre ellas 40 cm (entre ejes) y una luz de 4,26 m. En la cara superior había un revestimiento de tablas de madera de 16 mm de espesor y algunas piezas transversales ubicadas a tercios de la luz de las viguetas. La carga se aplicó en el

centro de la luz y se midieron deformaciones en tres puntos de la vigueta central y en el punto medio de la luz de las dos viguetas adyacentes. La deformación medida fue de 5,54 mm, mucho menor que la esperada para una viga biapoyada y aislada (11,4 mm). Los autores pudieron estimar el módulo de elasticidad en flexión de las tres viguetas a través del modelo numérico desarrollado y un procedimiento de optimización. Concluyeron que las pruebas de carga convencionales no son adecuadas para la evaluación de la resistencia en forjados de madera tradicionales.

2 OBJETIVOS

La presente tesis tiene como objetivo general abordar diversos aspectos relacionados con la evaluación de las propiedades mecánicas en estructuras de madera existentes con el fin de optimizar la capacidad de estimación. Para ello, se presentarán varios objetivos específicos que se han planteado en diferentes fases del estudio.

En primer lugar, se analizó la influencia de la variabilidad geométrica de la sección transversal en la estimación de la rigidez a flexión utilizando métodos acústicos. Se desea definir una sección nominal de la pieza que sea la más representativa de la misma para la estimación de la rigidez y resistencia a flexión, buscando un gasto de tiempo en la medición en obra que no sea muy elevado. Este proceder se mantiene a lo largo de las diferentes fases del trabajo. Dentro de la variabilidad del material se estudió la variación de las propiedades de la madera en función de la posición de la madera dentro de la altura del fuste del árbol. Esto pudo hacerse gracias a disponer de piezas enterizas con una longitud del orden de 11 m.

En segundo lugar, se investigó el efecto de la distancia entre sensores en las mediciones acústicas en piezas largas, así como la comparación de diferentes métodos de medición. Con esta investigación se quiere profundizar en el efecto de longitud que se produce en las piezas de madera.

Posteriormente, se buscó encontrar un equilibrio entre el número de mediciones y su contribución a la precisión de los modelos de predicción de densidad en la madera a través de técnicas no destructivas y su comparación con valores reales obtenidos por la relación entre masa y volumen.

También se estudió la aptitud de la técnica de vibración longitudinal para estimar las propiedades mecánicas de la madera procedente de estructuras existentes.

En la fase final de los trabajos, se presentó la ocasión para la aplicación en obra de los procedimientos en un edificio histórico. Esto permitió rodar los procedimientos para conocer su viabilidad práctica. Finalmente, se propone un esquema abreviado del protocolo general para la estimación de las propiedades mecánicas de estructuras de madera en flexión en obra.

A través de estos objetivos, se pretende ampliar el conocimiento y contribuir al avance en la evaluación y caracterización de estructuras de madera históricas.

3 MATERIAL Y MÉTODOS

3.1 Material

El material de ensayo empleado en la presente tesis consiste en un conjunto de 21 pares de madera con unas dimensiones nominales de 150 x 200 mm² y una longitud de 11 m y 4 piezas adicionales de madera con dimensiones nominales 150 x 200 mm² y 5 m de longitud aproximada procedentes del desmontaje de la estructura de la cubierta en las obras de restauración de Teatro Real Carlos III de Aranjuez, España realizado en la rehabilitación de 2008. A continuación, se detalla su procedencia y la preparación del material para las diferentes etapas llevadas a cabo en este trabajo.

3.1.1 *Procedencia e historia*

El material estudiado en el presente trabajo procede de la cubierta del Teatro Real Carlos III, situado en Aranjuez, Madrid, Figura 1. El arquitecto encargado de su proyecto fue Jaime Marquet (1710-1782). Entre las obras de Jaime Marquet se encuentran, además de otro teatro de Carlos III de Corte en San Lorenzo de El Escorial, Madrid (1771 - 1772), el palacio de los Duques de Alba, Piedrahita, Ávila (1755 - 1766); las cocheras de la Reina Madre, Aranjuez, Madrid (1758 - 1765); la casa de Correos de la Puerta del Sol, Madrid (1760 - 1768) y los Cuarteles de las Reales Guardias Españolas y Walonas, Aranjuez (1770 - 1772).

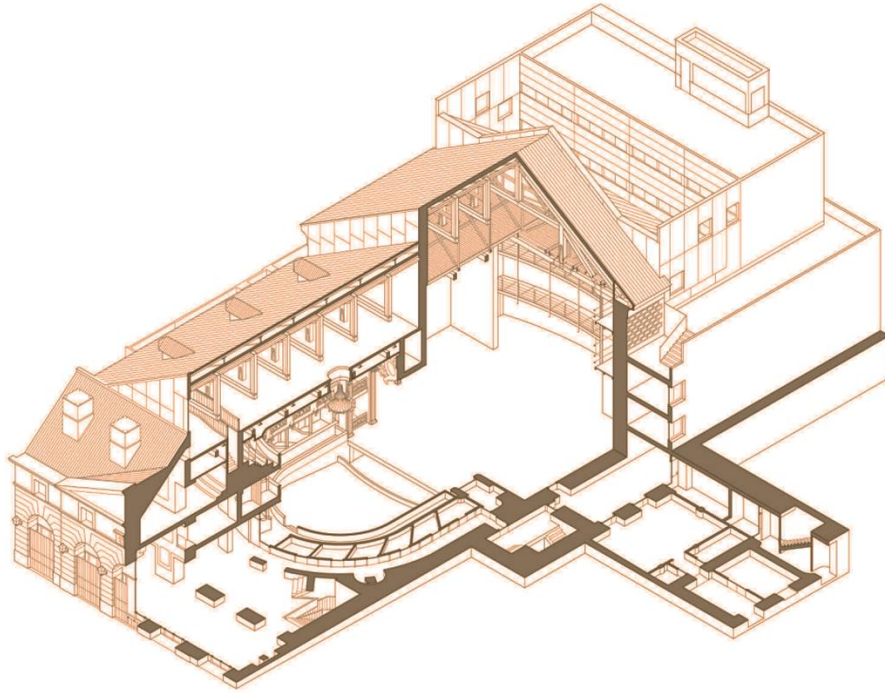


Figura 1. Representación en perspectiva axonométrica del Teatro Gran Coliseo de Carlos III, extraída folleto publicitario utilizado para promocionar su proceso de rehabilitación. (Dirección General de Arquitectura Vivienda y Suelo, 2015).

El Teatro Real Carlos III es considerado uno de los dos teatros de Corte cubiertos más antiguos de España, y es un notable ejemplo de la arquitectura teatral del siglo XVIII. El edificio tiene una capacidad para alrededor de 500 personas y cuenta con una platea, palcos, anfiteatro y alta, así como un escenario y dos salas de tertulia.

En 1.768, por mandato del monarca Carlos III, se inició la edificación del Teatro Real Coliseo Carlos III. La apertura oficial tuvo lugar un año después, concretamente el 14 de mayo de 1.769, y contó con la presencia del propio Carlos III, así como de la reina María Luisa de Borbón y de toda la familia real.

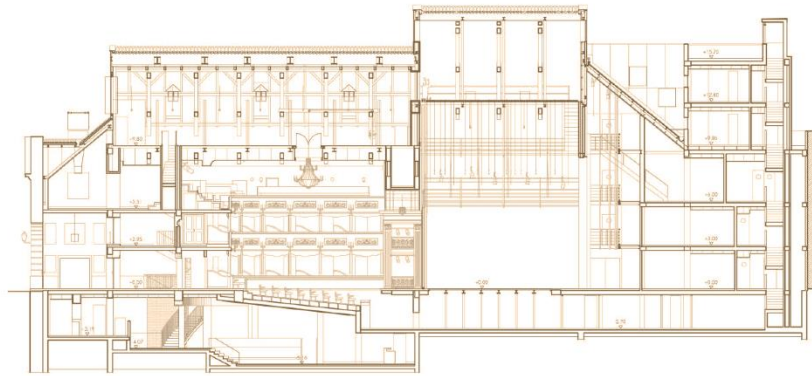
Entre los años 1.828 y 1.847 se realizaron diversas restauraciones en las que se incluyeron trabajos de pintura realizados por Felipe Reyes, así como la incorporación de bustos de autores dramáticos.

En el año 1.933 se decidió llevar a cabo una obra de conversión del teatro a sala de cinematógrafo, lo que supuso una importante transformación en su estructura original. En este proceso de conversión, se demolieron los palcos del teatro y se sustituyeron los muros originales por otros nuevos de hormigón. También se llevaron a cabo diversos espaciamentos en el escenario y los vestíbulos para obtener un mayor tamaño donde situar la pantalla de cine y los asientos para los espectadores. A pesar de estas modificaciones, el Teatro Real Coliseo Carlos III

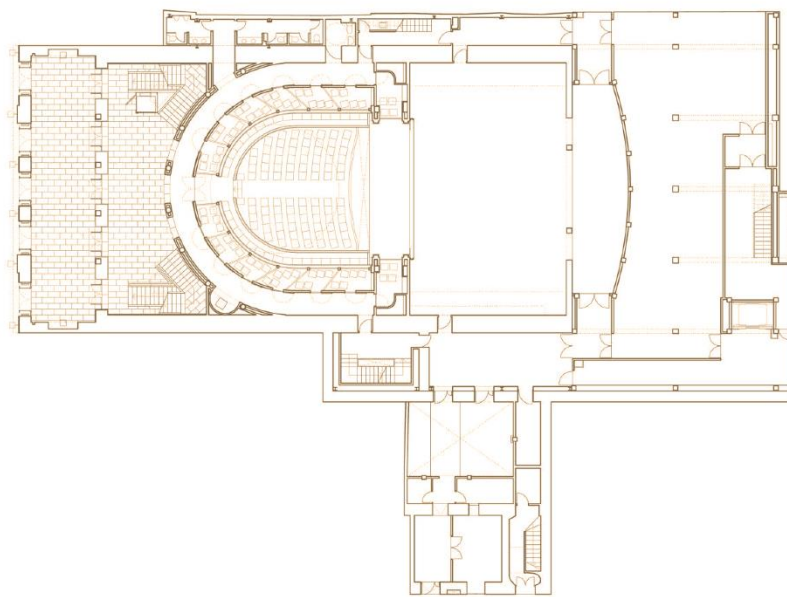
mantuvo su espíritu cultural y siguió siendo un espacio para el entretenimiento y la cultura.

En el año 1.989, cerró sus puertas después de casi dos siglos de historia. A raíz de su cierre, se redacta un proyecto de rehabilitación en agosto de 1.995. Quedó paralizado durante 12 años por la constructora, conservándose tan sólo en pie el frontal de cinco arcos y la piedra grabada por Juan de Iriarte, donde se puede leer las palabras: "*Rudos deliciis urbana adjecta. Voluptas Jussu CAROLI TERTII. Anno MDCCLXVIII*", (cuya traducción directa es: Sumado al lujo crudo de la ciudad. Placer de Carlos III. En el año 1.768).

Con el paso del tiempo, el edificio se deterioró y en 2.008 se llevó a cabo una importante obra de rehabilitación, en la que se restauró la fachada, el interior y la cubierta del teatro, Figura 2. En este momento el material de ensayo estudiado en la presente tesis fue desmontado de la cubierta y acopiado en las instalaciones de una industria de la madera (Intrama S.A.) que fue la que facilitó el material al proyecto de investigación que permitió este trabajo. La rehabilitación del teatro llevada a cabo por el arquitecto Mariano Bayón supuso un enriquecimiento patrimonial importante para España y permitió su reapertura el 5 de junio de 2.014. Actualmente el edificio cuenta con aquellos elementos originales que se habían conservado, como los frescos del techo o las piezas de madera en la cubierta del teatro.



Sección longitudinal



Planta baja

Figura 2. Representación de la sección longitudinal y la planta baja del Teatro Gran Coliseo de Carlos III, extraída del folleto publicitario utilizado para promocionar su proceso de rehabilitación. (Dirección General de Arquitectura Vivienda y Suelo, 2015).

3.1.2 Descripción de la estructura de la cubierta

Como se ha comentado anteriormente, para llevar a cabo la rehabilitación, se procedió al desmontaje de la estructura de la cubierta de donde proceden los 21 pares y 3 piezas sueltas, que fueron almacenadas bajo cubierta en las instalaciones de la empresa anteriormente citada.

La estructura de la cubierta original consistía en un sistema de cerchas con una luz aproximada de 18,40 m y una pendiente de 32°, Figura 3. Las cerchas tenían pares con una sección de 300 x 300 mm², tirantes de 300 x 400 mm² con dos empalmes de doble rayo de júpiter, un pendolón, dos péndolas, un nudillo y dos tornapuntas,

Figura 3. La separación a ejes de cerchas era de 2,60 m aproximadamente y sobre cada par descansaban dos correas intermedias con una sección de 150 x 200 mm², sobre las que apoyan los parecillos en la dirección de máxima pendiente separados entre ejes a 0,80 m aproximadamente y con una longitud total de 11,38 m. Los extremos de los parecillos apoyan en la correa de cumbreira y en el estribo inferior con embarbillado, Figuras 3 y 4. En este trabajo se contó con 21 de los parecillos. Estos parecillos se denominan en el resto de este documento como pares, por simplificar la terminología y por considerar que su escuadría es grande como para utilizar el diminutivo. En las obras de rehabilitación la estructura principal fue conservada, aunque su función estructural fue transferida a una nueva estructura de acero.



Figura 3. Fotografía del desmontaje de la cubierta del Teatro Real Carlos III de Aranjuez, España. Foto: Bayón Arquitectos S.A.

Como resultado de los trabajos llevados a cabo en la presente tesis, se concluyó que la estructura estaba intencionalmente construida cuidando de que la parte superior de los pares coincidiera con la parte superior del árbol. De esta forma la parte inferior del árbol que corresponde a una madera con poca nudosidad y con mayor porcentaje de duramen presentará mayor densidad, resistencia y durabilidad, justo en el lugar donde se producen más problemas de pudrición en caso de fallos de la impermeabilización de la cubierta, además de que las solicitaciones de compresión son mayores, Figura 4. El método para la identificación de la posición original del árbol puede consultarse en el apartado 3.4.6.2 “Influencia de la posición de la pieza en el árbol”.

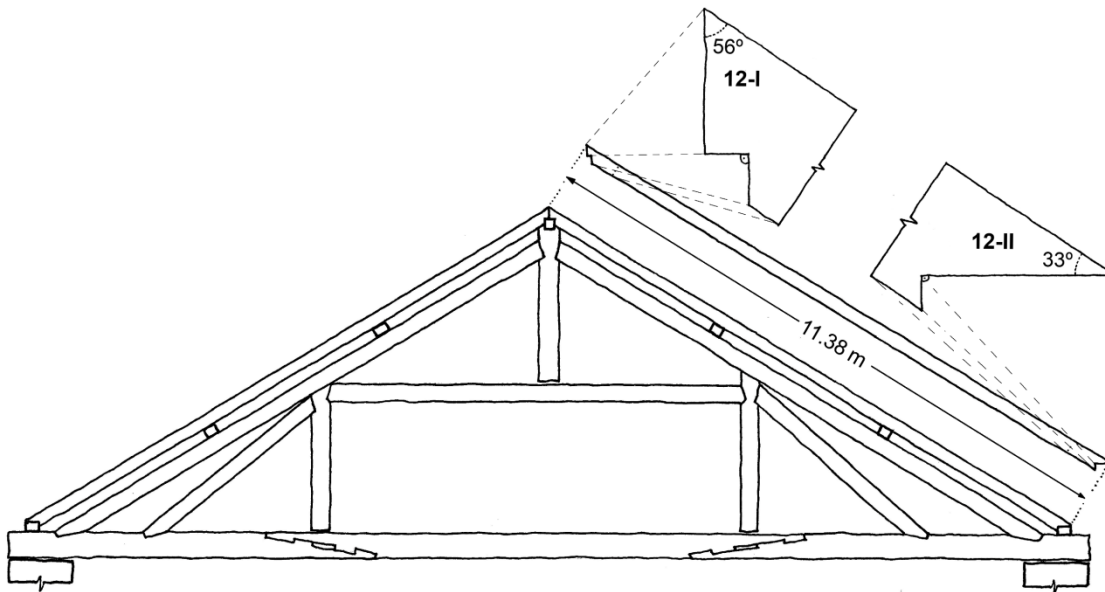


Figura 4. Esquema de una cercha de la cubierta del edificio y detalle de los extremos de uno de los pares.

3.1.3 Identificación de la especie de madera

Se identificó la especie botánica de las muestras mediante análisis anatómico de la madera por microscopía en el Laboratorio de Industrias de los Productos Forestales de la ETS de Ingeniería de Montes, Forestal y del Medio Natural de la Universidad Politécnica de Madrid. Previamente, se observó macroscópicamente que las muestras eran de una conífera, específicamente del género *Pinus* sp. Se extrajeron tres muestras procedentes de cada una de las piezas. Cada muestra se cortó en tres cubos orientados en las tres direcciones principales de la madera, se ablandaron en un baño maría con una disolución al 50 % de glicerina y agua, se cortaron en el microtomo en húmedo, se tiñeron con safranina y se montaron sobre un portaprobetas con resina incolora para su observación. En el Anexo A de la presente tesis puede consultarse en mayor detalle el procedimiento de identificación de la especie con microscopía, así como el informe realizado. La especie fue identificada como *Pinus sylvestris* L. o *Pinus nigra* Arnold ssp. *salzmannii* (Dunal) Franco, ya que ambas especies son indistinguibles anatómicamente con el método empleado.

Un estudio más concluyente para distinguir entre ambas especies fue desarrollado en el Laboratorio de Productos de Madera para la Construcción del Centro Nacional Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA-CSIC) dentro del departamento Instituto de Ciencias Forestales (ICIFOR). En colaboración con Eduardo Rodríguez Trobajo (comunicación personal), experto en dendrocronología, se realizó un estudio que evaluaba la relación entre los anillos de crecimiento, la procedencia y la comparación de valores entre *Pinus sylvestris* L. y *Pinus nigra* Arnold ssp. *salzmannii* (Dunal) Franco. Se concluyó que la especie se

trataba de *Pinus nigra* Arnold ssp. *salzmannii* (Dunal) Franco. La metodología se basó en la proporción entre los anillos de crecimiento entre el duramen y el total de la sección transversal del árbol de las especies de pino silvestre y laricio de procedencia española.

Se define k como el ratio entre el número de anillos en albura y el número de anillos total desde la médula hasta el cambium, ecuación (1):

$$k = \frac{\text{número de anillos en duramen}}{\text{número de anillos en total}} \quad (1)$$

Esta relación es diferente en ambas especies (mayor en el silvestre) y con ello se puede distinguir la especie. Para llevar a cabo la diferenciación, se empleó como base de comparación un conjunto de datos histórico de la base de datos del INIA-CSIC, consistente en el número de anillos de albura y total para diversos ejemplares de pino silvestre y laricio, Figura 5 (puntos azules y rojos, respectivamente). En el caso de las vigas, no siempre se encuentran presentes en la sección la médula y una gema para poder determinar el número de anillos de albura y totales del árbol. Por este motivo, se tomaron como muestras válidas aquellas piezas que contenían al menos la médula. Entre las muestras algunas piezas tenían gemas y se podía contar el número total de anillos. En las muestras donde no había gema, se añadieron los anillos estimando el conteo de anillos medio total de las piezas completas. Para corroborar esta distinción también se puede emplear el valor de la densidad como valor de referencia, ya que en pino laricio es mayor que en silvestre. En la Figura 5 puede observarse que las muestras del material de ensayo (cuadrados negros) se encuentran dentro de la tendencia del pino laricio.

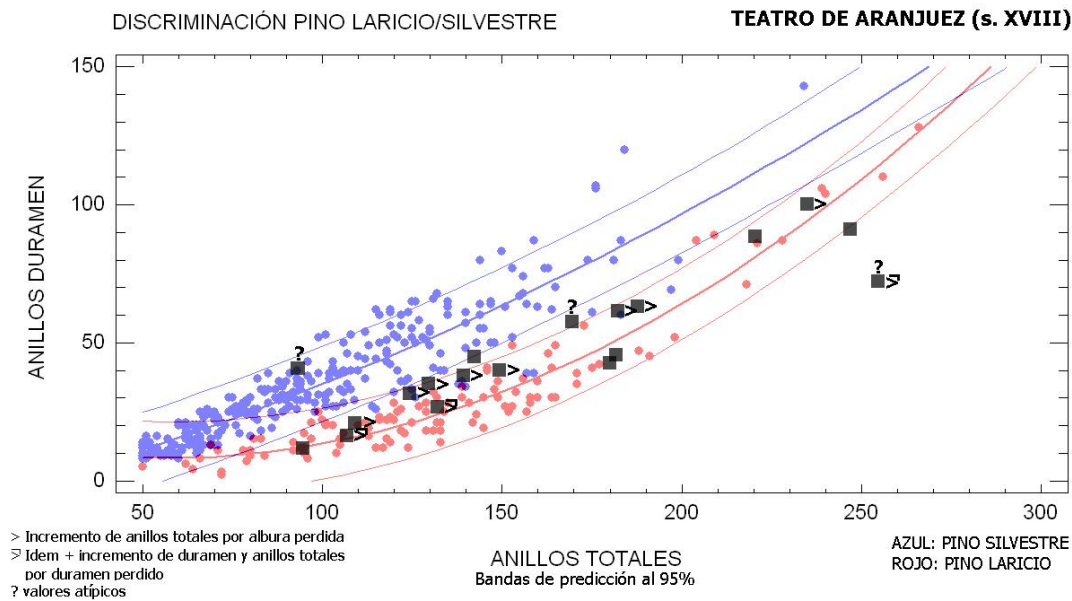


Figura 5. Resultados del estudio de identificación para la distinción entre piezas de pino silvestre y laricio. Los cuadrados negros son las piezas de la presente tesis. Fuente: Trobajo, E. (Comunicación personal).

3.1.4 Descripción de las probetas analizadas

El material de ensayo (probetas) se compone de 21 piezas con grandes dimensiones (lote cuya descripción se recoge en el apartado 3.3 “Piezas largas”) y 4 piezas de menor dimensión. Cronológicamente, las piezas con grandes dimensiones o largas fueron empleadas para diversos estudios detallados en los próximos epígrafes. Una vez analizados estos trabajos, se procedió a segmentar por la mitad las piezas largas dejándolas en 5 m de longitud aproximadamente, obteniendo un total de 42 piezas a las que se sumaron las otras 4 piezas procedentes de la cubierta y con las mismas características para formar un nuevo lote de estudio compuesto de 45 piezas. Este último lote se detallará en el epígrafe 3.4 “Piezas cortas”.

3.2 Equipos e instalaciones

3.2.1 Instalaciones de ensayo

Los primeros ensayos se llevaron a cabo en las instalaciones de la empresa Intrama S.A. localizada en Fuenlabrada, Madrid. Intrama S.A. es una empresa con gran prestigio en la fabricación y montaje en obra de todo tipo de carpintería de madera.

Los ensayos previos realizados en las instalaciones de la empresa Intrama S.A. fueron motivados por la dificultad que suponía la manipulación de estas piezas en las instalaciones de un laboratorio convencional dadas sus dimensiones (las dimensiones de las piezas superaban los 11 m de longitud). Las tareas desarrolladas en estas instalaciones fueron la limpieza, retestado y numeración de las piezas objeto de ensayo, la organización de los trabajos e hipótesis de partida, así como, los primeros ensayos no destructivos en las piezas sin reducir su longitud, Figura 6.



Figura 6. Pila de piezas de madera completa de 11 m de longitud en las instalaciones de Intrama S.A.

Una vez finalizados los primeros ensayos, las piezas se seccionaron en un nuevo lote con longitudes de pieza entre 4 y 5 m y se trasladaron al Laboratorio de Productos de Madera para la Construcción perteneciente al departamento Instituto de Ciencias Forestales (ICIFOR), Figura 7. Este departamento forma parte del Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA), que es a su vez, Centro Nacional de la Agencia Estatal Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) ubicado en Madrid. En este laboratorio se realizan tareas de investigación científica, de calidad y colaboración con entidades de todo el mundo de productos de la madera para la construcción.



Figura 7. Pila de madera de piezas seccionadas preparadas para su traslado a la zona de ensayo.

Las tareas desarrolladas en las instalaciones del Laboratorio de Productos de la Madera para la Construcción son ensayos no destructivos y destructivos de las piezas de madera ya cortadas, así como el estudio para la identificación de la especie entre *Pinus nigra* Arnold ssp. *salzmannii* (Dunal) Franco y *Pinus sylvestris* L.

En paralelo, la identificación anatómica de la madera, así como los primeros resultados de ensayos de humedad y densidad de la madera se llevaron a cabo en el Laboratorio de Industrias de los Productos Forestales de la Universidad Politécnica de Madrid, en la E.T.S.I. de Montes, Forestal y del Medio Natural (ETSIMFMN).

3.2.2 Máquina universal de ensayo

Los ensayos con máquina universal de ensayo se llevaron a cabo en las instalaciones del INIA-CSIC en el Laboratorio de Productos de la Madera para la Construcción. La máquina universal de ensayos utilizada es una máquina hidráulica con diferentes útiles disponibles según el tipo de ensayo que se desee realizar, Figura 8. En el caso del presente trabajo, se realizaron ensayos a flexión de las 45 piezas cortas hasta la rotura.

Para llevar a cabo los ensayos mecánicos se utilizó como referencia la norma española UNE-EN 408:2011+A1:2012 (2012). Las piezas fueron ensayadas con dos apoyos inferiores situados a una distancia de $L = 18h$ (en este caso, $L = 3.600$ mm), siendo h la altura de la sección (canto estructural) de la viga y L la luz. Los puntos de aplicación de la carga sobre la cara superior de la pieza fueron ubicados a tercios

de la luz (6h) con disposición simétrica. Se midió la deformación global situando un extensómetro en la cara inferior de la pieza acorde a la norma UNE-EN 408 (2012).



Figura 8. Ensayo a flexión biapoyado según norma UNE-EN 408:2011+A1:2012 (2012). Ejemplo de disposición de la pieza no. 03-I reconstruyendo la imagen a partir de tres imágenes frontales.

El módulo de elasticidad y la resistencia a flexión se han obtenido con las ecuaciones (2) y (3):

- Módulo de elasticidad global en flexión:

$$MOE_{sta,glo} = \frac{3 a L^2 - 4 a^3}{2 b h^3 \left(\frac{2 \Delta w}{\Delta F} - \frac{6 a}{5 G b h} \right)} = \frac{L^3}{56,347 I \left(\frac{\Delta w}{\Delta F} \right)} \quad (2)$$

- Resistencia a la flexión:

$$MOR = \frac{3 F a}{b h^2} \quad (3)$$

Donde:

$MOE_{sta,glo}$: es el módulo de elasticidad global en flexión en $N \text{ mm}^{-2}$;

a: es la distancia entre el apoyo y la carga más próxima, igual a 6h o L/3, en mm;

L: es la luz de ensayo, igual a 18h o 3a en mm;

b: es el ancho de la pieza en mm;

$\frac{\Delta w}{\Delta F}$: es la pendiente deformación-fuerza en el tramo elástico, en mm N^{-1} ;

G: es el módulo de elasticidad transversal, el cual se ha considerado infinito a efectos de cálculo de las propiedades mecánicas de acuerdo con la norma UNE 384 (2019);

I: es el momento de inercia de la pieza, definido como $b h^3 / 12$ en mm^4 ;

MOR: es la resistencia a flexión en $N \text{ mm}^{-2}$.

3.2.3 Equipos no destructivos

Equipos acústicos:

- Sylvatest DUO (SYL) (CBS-CBT, Francia-Suiza)

Es un equipo ligero y portátil que permite la medición del tiempo de transmisión de onda ultrasónica a través de la madera, Figura 9. Se compone de una consola donde recoge las mediciones realizadas. A esta se conectan dos sensores piezoeléctricos de punta cónica o exponenciales, (emisor y receptor) con una frecuencia de emisión de 22 kHz. Este equipo está dotado de batería, pero también puede utilizarse conectado a la red eléctrica con un transformador.

Sylvatest Duo proporciona la medición del tiempo de transmisión en μs y del pico de energía en mV. La medición del tiempo de transmisión se obtiene a través de la media de la lectura de 6 impulsos espaciados 1 s y el pico de energía de la media de 5 impulsos.

Entre las recomendaciones del fabricante, la distancia mínima para una medición es de 0,8 m entre los sensores emisor y receptor para garantizar la fiabilidad de los datos obtenidos. Este equipo puede ser sensible a factores como ruidos y vibraciones durante las mediciones realizadas. El uso de este equipo fue posible gracias a la Unidad Docente de Cálculo de Estructuras de la ETSI de Montes, Forestal y del Medio Natural de la UPM.



Figura 9. Sylvatest Duo con sensores cónicos de 22 kHz.

- USLab (USLab) (Agricof, Campinas, Brasil)

Se trata de un equipo que permite la medición del tiempo de transmisión de onda a través de ultrasonidos, Figura 10. Está compuesto de una consola con pantalla de

mayor tamaño que la del SYL, pero también portátil, donde se reflejan las mediciones realizadas a tiempo real de forma continuada en μs . Permite la conexión de dos sensores cónicos, un emisor y un receptor, así como, la posibilidad de conexión de un osciloscopio. Este equipo está dotado de batería, pero también puede utilizarse conectado a la red eléctrica con un transformador.

USLab proporciona la medición del tiempo de transmisión de la onda en μs . La resolución obtenida en la lectura de los datos es de $0,1 \mu\text{s}$.

Este equipo permite la utilización de sensores con diferentes frecuencias, además de los sensores de 45 kHz de serie. Es necesaria la calibración de los sensores al encender el equipo con una probeta testigo de valor conocido ($60 \mu\text{s}$).

El rango de uso para la distancia entre los sensores (mínimo y máximo) depende del tipo de sensores empleados. Si son sensores planos, además, se debe emplear un gel entre el sensor y la madera para su correcto acople. Este equipo puede ser sensible a ruidos y vibraciones durante la medición, ocasionando errores debidos a las diferencias entre las mediciones obtenidas. El uso de este equipo fue posible gracias a la Unidad Docente de Cálculo de Estructuras de la ETSI de Montes, Forestal y del Medio Natural de la UPM.



Figura 10. USLab con sensores cónicos de 45 kHz .

- MicroSecond Timer (MST) (Fakopp Enterprise, Sopron, Hungría)

Es un equipo portátil y de precio asequible que permite la medición del tiempo de transmisión de ondas acústicas en μs (con una resolución de $1 \mu\text{s}$). Se compone de

una consola donde se refleja las mediciones realizadas en una pantalla numérica, Figura 11. Este equipo consta de dos sensores con forma de punzón (sensor y receptor) que se conectan a la consola a través de cables. El equipo recibe energía a través de una batería de 9 V.

El MicroSecond Timer proporciona una medida recogiendo la onda acústica producida a través de un impacto mecánico sobre la superficie del sensor emisor. Este tipo de ondas se denomina con frecuencia ondas de impacto. Este impacto lo realiza el operador con un golpe limpio y preciso con la ayuda de un martillo. Este impacto provoca un frente de ondas de varias frecuencias y el receptor dispone de un sensor piezoeléctrico que detecta el tiempo de la llegada de la onda. A diferencia con otros equipos como SYL o USLab, el acoplamiento de los sensores con forma de punzón no requiere de un pretaladro de acople entre la madera y el sensor, facilitando su uso *in-situ*. El acoplamiento de los sensores se realiza con impactos sobre el sensor con un martillo de goma para penetrar la madera entre 1-2 cm de profundidad de la punta del sensor. El uso de este equipo fue posible gracias a la Unidad Docente de Cálculo de Estructuras de la ETSI de Montes, Forestal y del Medio Natural de la UPM.



Figura 11. MicroSecond Timer con sensores con forma de pincho y martillo de accionamiento de la onda acústica.

Equipo de vibración:

- Portable Lumber Grader (PLG) (Fakopp Enterprise, Sopron, Hungría)

Es un equipo portátil que permite la medición de la frecuencia natural de vibración longitudinal o transversal de la madera. Se compone de una balanza, un amplificador de señal para la balanza, unos apoyos acolchados, un micrófono unidireccional con un rango de frecuencias entre 100 y 15000 kHz, un martillo de

200 g de masa y un programa informático para la obtención de la frecuencia y su posterior clasificación por clase resistente, Figura 12.

El equipo Portable Lumber Grader, recoge la señal acústica a través del micrófono. El espectro de la señal es analizado mediante la Transformada Rápida de Fourier (FFT – Fast Fourier Transformed) para obtener la frecuencia natural de la pieza en Hz. La resolución del equipo es de 1 Hz, la de la balanza de 10 g y el micrófono tiene una sensibilidad de -56 dB.

Para una buena práctica, es recomendable una temperatura ambiente comprendida entre 5 y 40 °C. La pieza debe vibrar libremente. Se recomienda inducir la vibración a través de un martillo cuya masa esté comprendida entre el 0,5 y el 3 % de la masa de la pieza. El uso de este equipo fue posible gracias a la Unidad Docente de Cálculo de Estructuras de la ETSI de Montes, Forestal y del Medio Natural de la UPM.



Figura 12. Detalle de los extremos de la pieza medida con PLG.

Equipos de medición del contenido de humedad:

- Xilohigrómetro RTU 600 (Gann Mess-u Regeltechnik GmbH, Alemania)

Es un equipo portátil que permite estimar el contenido de humedad de la madera, Figura 13. Está compuesto de una consola, conectada a dos electrodos acoplados en dos clavos aislados (M18 – Teflón de 60 mm de profundidad). En la estructura donde se acoplan los dos clavos aislados, para facilitar su penetración en la madera, el equipo está dotado de una maza de la que se puede hacer uso, o bien, sustituirlo por una maza externa si es necesario que queden fijados a la pieza. La alimentación se lleva a cabo mediante una pila de 9 V. La profundidad que deben alcanzar los clavos para medir el valor medio del contenido de humedad es de 1/3 del grueso de

la pieza y se disponen a una distancia de 30 mm. Si no hay un gradiente de humedad la medición no requiere alcanzar la profundidad de un tercio.

Previamente a la medición, en la consola, se debe seleccionar la especie y la temperatura ambiente. El equipo dispone de un sensor para medir la humedad relativa y temperatura ambiente. Es recomendable, para una buena práctica, no medir humedades por encima del 30 % de contenido en humedad, de lo contrario, las medidas podrían ser menos exactas. Se debe calibrar el equipo antes de utilizarlo con un calibrador específico, donde se conectan los electrodos y debe dar la medida especificada en este. La precisión de este equipo será correcta para temperaturas ambiente de -10 a 60 °C.

Todas las medidas realizadas en el presente trabajo han sido realizadas de acuerdo con las especificaciones de la norma UNE-EN 13183-2:2002 (2002).



Figura 13. Xilohigrómetro de resistencia eléctrica Hydromette RTU 600 con electrodos, calibrador, captador de humedad ambiental.

Equipos de estimación de la densidad:

- Wood Pecker (WP) (Diagnostic Research Company, Ancona, Italia)

Es un penetrómetro portátil que permite la medición indirecta de la densidad de la madera, Figura 14. Este equipo ha sido desarrollado a través de una modificación de un esclerómetro tipo N que sirve para la estimación de la resistencia a compresión en hormigón. Lleva integrado una aguja de acero templado rectificado de dureza Rockwell en la escala C (HRC) de 60 de forma cilíndrica con un diámetro de 2,5 mm y una longitud de 50 mm. La aguja termina en su extremo con una punta tronco-cónica con ángulo de inclinación de 35 °. El sistema interno del equipo está compuesto por un martillo de rebote ajustado a la aguja que debe activarse un

número determinado de veces, cada activación otorga un golpe con una energía de 2,207 J.

Para obtener el parámetro de penetración en la madera, tras clavar la aguja en la superficie de la madera, se procede a la medición del extremo sobresaliente con un comparador digital o analógico en mm. La resta de la longitud total de la aguja menos la distancia sobresaliente proporciona la penetración alcanzada en mm. Este parámetro se puede correlacionar directamente con la densidad en la superficie de la madera. En el presente trabajo, se adoptó tomar 3 golpes del martillo de acuerdo a las recomendaciones del fabricante.

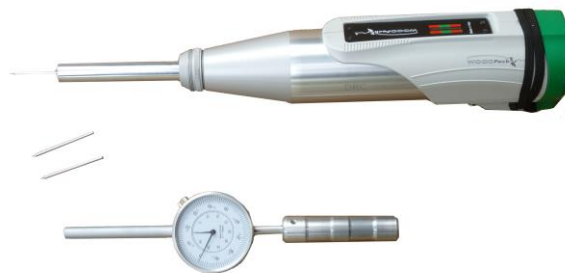


Figura 14. WoodPecker density meter device.

- Pilodyn 6J Forest (PIL) (Proceq, Schwerzenbach, Suiza)

El equipo Pilodyn 6J Forest, Figura 15, es un penetrómetro portátil con el que se puede estimar la densidad de la madera correlacionando la variable medida, profundidad de penetración, con la densidad de la madera. Se compone de un martillo interno que transmite a través de su activación una energía de 6 J a una varilla de 2,5 mm de diámetro situada en uno de los extremos del equipo. La varilla tiene forma cilíndrica y la punta es plana con un uso aproximado de 5000 mediciones. En la parte central del aparato hay una pantalla con una regla de medición que permite la lectura entre 0 y 40 mm de profundidad de penetración.



Figura 15. Pilodyn con tapa metálica y pieza en T para su carga.

- Screw Withdrawal Resistance Meter (SWRM) (Fakopp, Sopron, Hungría)

También conocido como equipo de arranque de tornillos, Figura 16, este equipo fue diseñado para medir la fuerza máxima requerida para la extracción de un tornillo insertado en la madera. Cuanto mayor es la fuerza de extracción del tornillo, mayor es la densidad de la madera.

Los tornillos empleados pueden tener diferencias como el paso de rosca, longitud o grosor, entre otros. En la presente tesis se han empleado tornillos de la marca comercial Heco-Fix plus con una cabeza de tornillo Spax (PZD). El tornillo tenía un diámetro de 4 mm y 70 mm de longitud, su composición es de zinc amarillo y la longitud de penetración fue de 20 mm.



Figura 16. Equipo de arranque de tornillos con célula de carga, soporte y consola.

Equipo de resistografía:

- Resistógrafo IML Resi F400S (IML, Wiesloch, Alemania)

El resistógrafo IML Resi F400S es un dispositivo de alta precisión utilizado para evaluar el estado de la madera en el árbol o en piezas de madera maciza, Figura 17. Con este equipo no es necesario cortar o dañar la pieza de madera para obtener información sobre su integridad. Consta de un componente mecánico adaptado a un taladro. El componente mecánico incluye una consola que muestra la configuración seleccionada para cada medición, una aguja con una punta de 3 mm de diámetro y 380 mm de longitud para penetrar longitudinalmente, así como, un portapapeles para las resistografías.

El resistógrafo IML Resi F400S utiliza una técnica de perforación que consiste en introducir una aguja en la madera, y se mide el consumo de energía eléctrica del motor a través de un potenciómetro causado por el avance a velocidad constante de la aguja. Este consumo eléctrico proporciona información sobre la densidad y la uniformidad de la madera, así como la presencia de defectos internos, tales como huecos, podredumbre, fendas, etc.

Este resistógrafo es muy utilizado por los profesionales del sector forestal, así como por los expertos en construcción y restauración de edificios antiguos, ya que permite una evaluación rápida y precisa de la integridad interna de la madera.



Figura 17. Resistógrafo IML Resi F400S.

3.2.4 Equipos semi destructivos

Equipo para la estimación de la densidad:

- WoodExtractor (WoodEx) (GICM-UPM, Madrid, España):

Dispositivo que se acopla a una taladradora comercial y que permite extraer un volumen determinado de madera en forma de virutas, Figura 18. Estas virutas se

utilizan para estimar la densidad de la pieza de madera mediante la relación entre su masa y el volumen del hueco generado. Durante el proceso de taladrado, las virutas se recogen en una bolsa de papel filtro mono uso. El taladro comercial empleado en este trabajo fue el Bosh PSB 50 (Bosch, Gerlingen, Alemania) con una velocidad en vacío (sin presión) de 3000 rpm, un torque máximo de 8.5 N m, una potencia de 500 W y una potencia útil de 228 W. La broca acoplada al taladro tenía 8 mm de diámetro y la longitud de penetración en la madera era de 47 mm, obteniendo un volumen de extracción total de virutas de 2362 mm³.

La técnica de uso implica establecer un volumen conocido de extracción al fijar el diámetro de la broca y la profundidad de taladrado, lo que permite correlacionar la masa de virutas del volumen taladrado con la densidad de la madera.



Figura 18. Detalle de los componentes del WoodExtractor.

3.2.5 Equipos auxiliares

Motosierra: Modelo ZSK EC/400 HM (Mafell, Alemania), utilizada para retestar las piezas de madera.

Taladro con broca cónica: Modelo HITACHI DS 14DVF2, utilizado para realizar los pretaladros para los sensores exponenciales o cónicos.

Comparador digital: Equipo de medición de la deformación en el ensayo a flexión. Resolución de 0,01 mm.

Reloj comparador: Equipo de medición de la deformación en el ensayo a flexión. Resolución de 0,01 mm.

Escuadra: Herramienta de carpintería, empleada en el marcado y medición geométrica de las piezas.

Galgas: Herramienta de medición de espesores. Empleado para la medición de fendas y clasificación visual de las piezas.

Placas de acero: Empleadas para realizar el ensayo mecánico en piezas largas en las instalaciones de la empresa Intrama S.A, Figura 19. La masa de cada pieza se muestra en la Tabla 1:

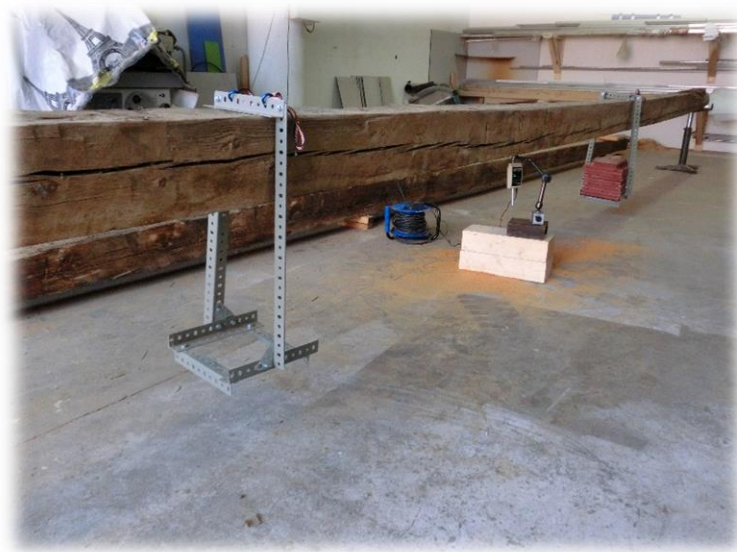


Figura 19. Ensayo mecánico a flexión en piezas de 11 m empleando un sistema de placas de acero y soportes metálicos.

Tabla 1. Lista de masas en gramos asociados a cada una de las placas de acero empleadas para el ensayo a flexión no destructivo en piezas largas.

Número de placa	Masa (g)	Masas acumuladas (g)
1	5.830	5.830
2	5.777	11.607
3	5.820	17.427
4	5.853	23.280
5	5.747	29.027
6	5.877	34.904
7	5.809	40.713
8	5.851	46.564
9	5.799	52.363
10	5.755	58.118
11	5.868	63.986
12	5.847	69.833
13	5.764	75.597
14	5.845	81.442
15	5.771	87.213
16	5.758	92.971
17	5.855	98.826
18	5.826	104.652
19	5.769	110.421
20	5.869	116.290
21	5.798	122.088
Total	122.088	

Trazador: Empleado para la medición de la desviación de la fibra.

Soportes de carga: Apoyo para las placas de acero empleadas en los ensayos a flexión en las piezas largas.

3.3 Piezas largas

El lote está compuesto por 21 pares de cubierta con dimensiones nominales 150 x 200 mm² y una longitud de 11 m aproximadamente. Estas piezas tenían una longitud elevada lo que permitió realizar un análisis de los posibles efectos de la longitud con más rango que lo que sería posible con piezas de menor esbeltez o longitud, que son las más habituales en estructuras existentes. A continuación, se detallan las mediciones efectuadas y los estudios sobre este material.

3.3.1 Secciones de referencia

Se definieron unas secciones transversales de referencia (reference cross-section en inglés o RCS), que dividen la pieza en partes iguales con longitud de 1 m y dejan al menos 20 cm desde los extremos, Figura 20. Se numeraron de forma ascendente de RCS0 a RCS10. La sección transversal RCS0 correspondía a la parte más alta del árbol en cada pieza y RCS10 a la parte inferior del árbol. A estas secciones se hará referencia en cada parte del trabajo.

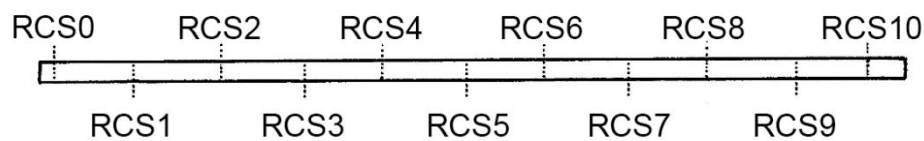


Figura 20. Secciones transversales de referencia representadas longitudinalmente cada 1 m en una pieza de 11 m.

3.3.2 Contenido de humedad

El contenido de humedad en las piezas largas fue medido por medio de un xilohigrómetro resistivo RTU 600 (Gann Mess-u Regeltechnik GmbH, Alemania) en dos fases del trabajo: el primero en el momento de llevar a cabo las mediciones con técnicas no destructivas y el segundo, durante la realización de los ensayos mecánicos de acuerdo a la norma UNE-EN 13183-2 (2002).

Se tomaron tres lecturas, una en la sección central de la pieza y dos en los extremos separados una distancia de 60 cm desde la testa. El valor adoptado del contenido de humedad fue la media aritmética de los tres. La profundidad de los electrodos con fuste aislado (recubierto de teflón) alcanzada en las mediciones fue del valor máximo que permitía la longitud del electrodo (aproximadamente 35 mm) Esto representa aproximadamente un cuarto del grueso de la pieza, que queda muy cercano al tercio, donde se determina el valor medio del contenido de humedad en

una pieza con gradiente de humedad. Las mediciones se realizaron con los electrodos introducidos en dirección perpendicular eje longitudinal de la pieza.

3.3.3 Clasificación visual

La clasificación visual se realizó siguiendo las instrucciones de la norma UNE 56544 (2011) para coníferas. Se llevó a cabo la clasificación visual de las piezas sobre la longitud total de la pieza. Los resultados están recogidos en un estudio previo (Osuna Sequera, 2017; Osuna-Sequera et al., 2021) donde se detallan los criterios adoptados, Tabla 2. La aplicación de la norma da lugar a la calidad MEG (Madera de Gruesa escuadría, y a rechazo.

Tabla 2. Clasificación visual con diversos criterios. Fuente: (Osuna Sequera, 2017).

		Resultados de Clasificación Visual			
		MEG		Rechazo	
		Nº de piezas	%	Nº de piezas	%
Parámetros	Nudos	18	86	3	14
	Desviación de la fibra	21	100	0	0
	Fendas	12	57	9	43
	Deformaciones	14	67	7	33
	Alteraciones biológicas	10	48	11	52
	Gemas	6	29	15	71
Criterios	Completo	1	5	20	95
	Sin alteraciones biológicas	1	5	20	95
	Sin alteraciones biológicas, ni fendas, ni gemas	10	48	11	52
	Nudos y desviación de la fibra	18	86	3	14

En la Tabla 2 se recoge el número de piezas que clasificadas como MEG o rechazo para cada parámetro de clasificación. De esta manera se puede observar cuales son los defectos más limitantes de la clasificación. Los parámetros más limitantes en la asignación de las clases fueron las gemas, seguido de las alteraciones biológicas, fendas, deformaciones y nudos, en orden decreciente. Por otro lado, se consideraron diferentes niveles de aplicación de los criterios de clasificación: el “completo” que resulta de la aplicación de todas las especificaciones de la normativa, “sin alteraciones biológicas” excluyendo los criterios de ataques biológicos, “sin alteraciones biológicas, ni fendas, ni gemas” que excluye los criterios de ataques biológicos, fendas y gemas y, por último, la consideración de tan solo nudos y desviación de fibra.

Dentro de los criterios analizados, el criterio “completo” rechazó el 95 % de las 21 piezas largas. Si se consideran los parámetros de nudosidad y desviación de la fibra se obtiene un 86 % de clasificación MEG en el lote de madera.

3.3.4 *Módulo de elasticidad dinámico mediante la medición de tiempos de transmisión de la onda*

Aprovechando la excepcional longitud de las piezas estudiadas, se realizaron mediciones a diferentes distancias con los equipos MST de ondas de impacto, SYL y USLab de ultrasonidos.

3.3.4.1 *Velocidad global*

Para la obtención de la velocidad de transmisión de la onda, previamente se realizaron mediciones del tiempo de transmisión de onda o tiempos de vuelo con los equipos acústicos. El posicionamiento de los sensores se realizó en las secciones transversales (RCS), Figura 20, situando los sensores emisor y receptor en diferentes puntos, incrementando o disminuyendo la distancia entre ellos. La determinación de la velocidad global se realizó a través de la inversa del coeficiente b de la ecuación (4) procedente de una regresión lineal entre el tiempo de vuelo y la longitud entre los sensores.

$$ToF = a + b \cdot L \quad (4)$$

Donde:

ToF: es el tiempo de vuelo en s;

L: es la longitud entre los sensores en m;

a : es el término independiente de la regresión e indica el factor del retraso del tiempo (en inglés Time-Lag o tL), el cual permite la corrección de las velocidades en s.

b : es el coeficiente de la variable independiente, su inversa proporciona la velocidad de transmisión de onda global en $m \cdot s^{-1}$.

3.3.4.2 *Velocidad local*

Las velocidades locales se definen como la velocidad obtenida con la distancia entre dos puntos i - j , y el tiempo resultante de la diferencia entre dos lecturas de tiempo (ToF_i y ToF_j) respecto al origen (sección RCS0, Figura 20), Figura 21.

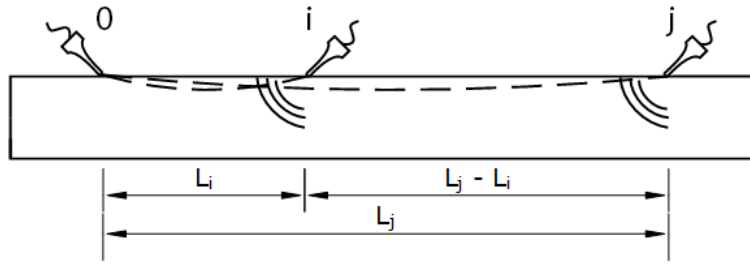


Figura 21. Esquema de medición de velocidad local entre dos puntos i y j. Fuente: (Osuna-Sequera, Arriaga, et al., 2019).

La velocidad local se calcula a través de la ecuación (5).

$$V_{i-j} = \frac{L_j - L_i}{ToF_j - ToF_i} \quad (5)$$

Donde:

V_{i-j} : es la velocidad de transmisión de onda en $m s^{-1}$ entre los puntos j e i.

L_j y L_i : son las longitudes en m entre los sensores en los puntos j e i, respectivamente;

ToF_j y ToF_i : son los tiempos de transmisión de onda en s en los puntos j e i, respectivamente.

3.3.4.3 Tipos de mediciones: directas, semidirectas e indirectas

Las mediciones con los equipos no destructivos acústicos se realizaron posicionando los sensores con diferentes configuraciones, Figura 22. En primer lugar, las mediciones directas o de testa a testa, donde se colocaron los sensores en los extremos de las piezas formando un ángulo de 90° con la superficie de la testa centradas en el eje vertical de la pieza y situadas a $\frac{h}{3}$ y $\frac{2h}{3}$ (siendo h la altura de la sección o canto estructural) definiéndose como medición directa superior o inferior desde la superficie del canto superior de la pieza, respectivamente. En segundo lugar, las mediciones semidirectas o superficiales sobre el canto son aquellas que, situando los sensores a 45° sobre la superficie y con las puntas enfrentadas, se sitúan como mínimo a una distancia de 20 cm de los extremos y se pueden realizar sobre el canto superior o inferior de las piezas. Por último, las mediciones indirectas o cruzadas de cara a cara son aquellas donde los sensores se sitúan a 45° sobre la superficie de caras opuestas de la pieza dejando 20 cm al menos de distancia con las testas de la pieza y enfrentando ambas puntas de los sensores en las medidas frontales o posteriores.

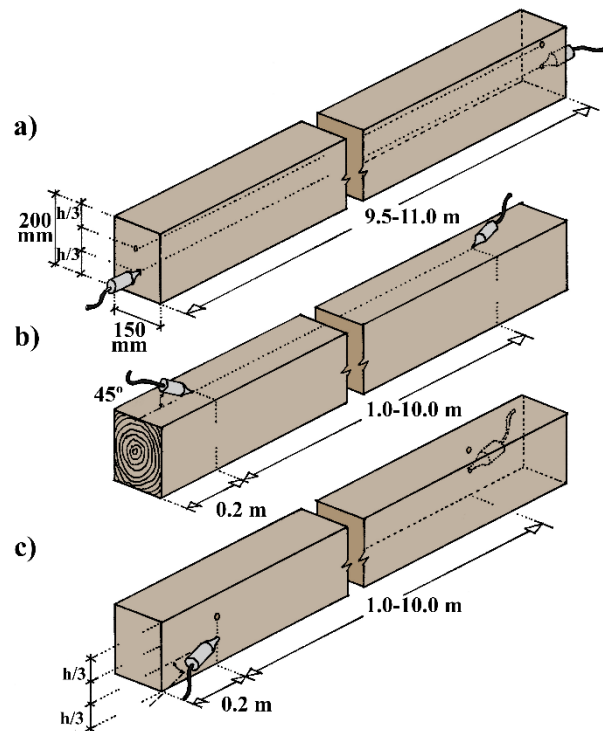


Figura 22. Detalle de las mediciones directas, indirectas y semidirectas. Fuente: (Osuna-Sequera et al., 2021).

Por lo tanto, las velocidades globales y locales pueden referirse a su vez a velocidades superficiales-canto (indirectas) o cruzadas-cara (semidirectas).

3.3.4.4 Módulo de elasticidad dinámico

Por último, la determinación del módulo de elasticidad dinámico en el material de ensayo se realizó a través de la ecuación (6). Dependiendo de la velocidad utilizada, global o local, se puede diferenciar el módulo de elasticidad dinámico global o local.

$$MOE_{dyn} = \rho \cdot V^2 \quad (6)$$

Donde:

MOE_{dyn} : es el módulo de elasticidad dinámico;

ρ : es la densidad en kg m^{-3} ;

V : es la velocidad en m s^{-1} .

En el Capítulo 5 “INFLUENCIA DE LA LONGITUD” pueden encontrarse más detalles de este estudio (Osuna-Sequera, Arriaga, et al., 2019).

3.3.4.5 Efecto de longitud

Se plantea la hipótesis de la existencia de un efecto de variación de la medición de la velocidad de propagación de la onda con equipos acústicos no destructivos

debido a la longitud de la pieza o de la distancia entre los sensores. Para estudiar dicho efecto se estudiaron los ratios definidos por la ecuación (7).

$$\frac{V_{i,j,k}}{V_{i,glo}} \quad (7)$$

Donde:

$V_{i,j,k}$: es la velocidad de transmisión de la onda en $m s^{-1}$ por diferencias (situando el sensor en un punto i (RCS i) y el sensor restante en j (RCS j), con esta configuración $V_{ij} = \text{Distancia entre } i - j \text{ en (m)}/(\text{ToF}_j - \text{ToF}_i) \text{ (s)}$ y k es un parámetro de configuración de sensores sobre las piezas donde $k = c$ si la velocidad ha sido corregida por el efecto del retardo de la onda (Time-Lag en inglés o tL), y se omite si no está corregida.

$V_{i,glo}$: es la velocidad de transmisión de la onda global en $m s^{-1}$, donde:

$i = s$ si se trata de una medición indirecta (superficial) o $i = c$ si la medida es semidirecta (cruzada).

La relación entre el ratio frente a la distancia considerada en todas las mediciones permite conocer la desviación que se puede producir entre velocidades globales y locales. Si se procede a realizar una corrección la variabilidad entre las mediciones disminuye.

En el Capítulo 5 “INFLUENCIA DE LA LONGITUD” se detalla en profundidad este estudio (Osuna-Sequera, Arriaga, et al., 2019).

3.3.5 Módulo de elasticidad dinámico mediante el análisis de vibración longitudinal

La frecuencia de vibración de una pieza de madera está relacionada con sus propiedades físicas y mecánicas. La medición de la frecuencia natural de vibración longitudinal de la madera permite la determinación del módulo de elasticidad dinámico a través de la resolución de la ecuación diferencial de propagación de ondas planas longitudinales a través de una sección longitudinal constante, ecuación (8), (Íñiguez-González, 2007).

$$MOE_{dyn} = V^2 \rho = (2Lf)^2 \cdot \rho \quad (8)$$

Donde:

MOE_{dyn} : es el módulo de elasticidad dinámico en $N mm^{-2}$;

V : es la velocidad de la onda;

L: es la longitud de la pieza;

f: es la frecuencia de vibración natural longitudinal de la pieza en Hz;

ρ : es la densidad en kg m^{-3} .

La vibración de la pieza se generó mediante el impacto con un martillo con un peso de 200 g en una de las testas con la pieza apoyada en sus extremos. La pieza se apoyó en los extremos dejando libre el vano entre estos para que la pieza vibre libremente como se muestra en la Figura 23. El sonido producido es registrado por el micrófono y de la señal se deduce la frecuencia natural, como se explicó en 3.2.3. La densidad utilizada en la ecuación (8) puede ser la densidad global, obtenida a través de la división de la masa de la pieza y su volumen obtenido con dimensiones nominales, o la densidad real, empleando el mismo cociente con un volumen real estimado con la forma real correspondiente al perímetro de la sección. De esta manera se obtiene una densidad de la madera más real en el caso de piezas con secciones irregulares, como es el caso habitual de piezas procedentes de estructuras existentes.

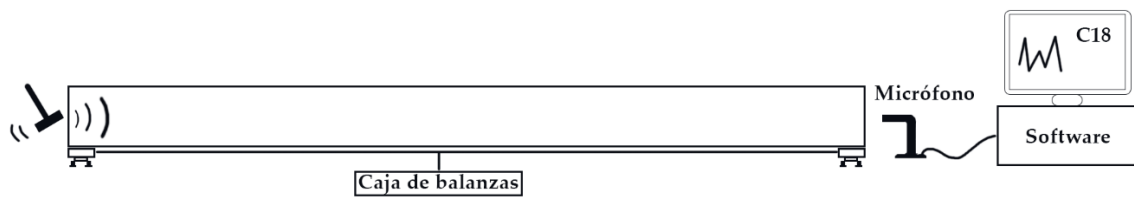


Figura 23. Ensayo de vibración longitudinal. Disposición del impacto con martillo, micrófono, caja de balanzas y software de procesamiento.

El estudio completo puede encontrarse en el Capítulo 4 “INFLUENCIA DE LA VARIACIÓN DE LA SECCIÓN” (Osuna-Sequera et al., 2020).

3.3.6 Efecto de la variación en la geometría de la sección en mediciones con técnicas no destructivas (acústicas y vibración) en piezas largas

Se analizó cómo la variación de la sección a lo largo de las piezas puede influir en la obtención de las propiedades mecánicas, MOE_{dyn} y MOR, a través de modelos estadísticos. Para ello, se estableció una sección nominal (Nominal Cross Section, (NCS) de la pieza determinada de cinco maneras diferentes. Las dimensiones de la sección transversal se midieron con una forcípula forestal como se muestra en la Figura 24.

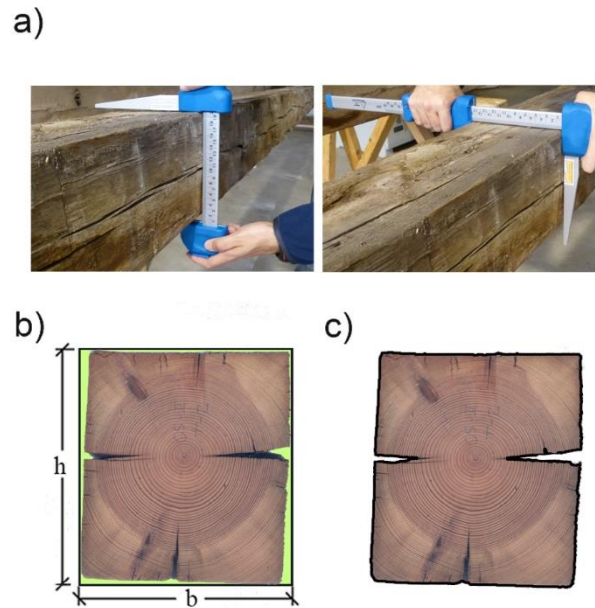


Figura 24. Métodos de medición de la sección transversal. a) ejemplo de medición con forcípula; b) ejemplo de sección transversal obtenida para el ancho y alto de la pieza en comparación con la forma perimétrica real; c) obtención del área real ajustado al perímetro real de la pieza.

Las secciones transversales consideradas para este estudio fueron la inicial, la final y las pares (RCS0, RCS2, RCS4, RCS6, RCS8 y RCS10), Figura 20. La sección nominal se estableció de los cinco modos siguientes: el grupo A define la sección nominal con la media de las dimensiones (ancho y canto) medias de todas las secciones transversales, el grupo B sólo considera la zona central de la pieza y se subdivide en B1 que sólo considera una sección central, RCS4, y B2 que considera la media de las secciones RCS4 y RCS6, el grupo C considera la geometría de los extremos de la pieza y se subdivide en C1 que considera la sección RCS0 y CS2 que considera las dimensiones medias de dos secciones extremas, RCS0 y RCS2.

Finalmente, se determinaron las regresiones lineales entre los módulos de elasticidad estáticos obtenidos según los ensayos mecánicos de acuerdo a la norma UNE-EN 408 (2012) para cada sección nominal considerada y los módulos de elasticidad dinámicos obtenidos para cada técnica no destructiva. La sección nominal asignada en el cálculo influye directamente en el momento de inercia calculado según la ecuación (2). Adicionalmente, se consideró utilizar la densidad real ajustada al perímetro de las secciones transversales en la ecuación (8).

En el Capítulo 4 “INFLUENCIA DE LA VARIACIÓN DE LA SECCIÓN” se detalla en profundidad este estudio (Osuna-Sequera et al., 2020).

3.4 Piezas cortas

El lote está compuesto por 45 piezas en total procedentes de los 21 pares cortados por la mitad y retestados y 3 piezas adicionales procedentes de la estructura de la cubierta. Las dimensiones nominales de estas piezas son $150 \times 200 \text{ mm}^2$ y 5,4 m de longitud. Las piezas cortas fueron analizadas desde varios puntos de vista como su clasificación visual, la comparación entre sus propiedades físicas y mecánicas dependiendo de la parte del árbol de la que proceden, así como de la estimación de estas propiedades a través de técnicas no destructivas y la construcción de modelos estadísticos para su predicción.

3.4.1 Secciones de referencia

Las piezas largas se cortaron por la mitad obteniendo dos piezas cortas de cada pieza larga. Las piezas que pertenecían a la parte más alta del árbol se denominaban como del grupo I, y las piezas de la parte baja como del grupo II, Figura 25. En cada pieza se fijaron 5 secciones de referencia separadas a una distancia igual a 4,5 veces el canto nominal de la pieza ($h = 200 \text{ mm}$) y las secciones extremas serán las coincidentes con los apoyos en el ensayo a flexión que se describirá posteriormente.

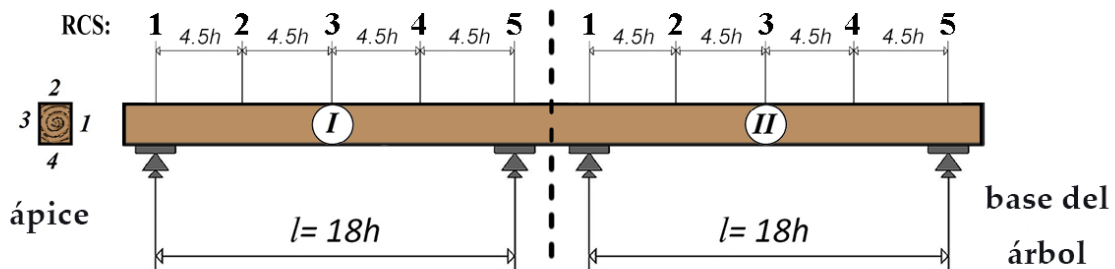


Figura 25. Subdivisión de piezas largas en dos cortas del grupo I y II y secciones de referencia.

3.4.2 Contenido de humedad

El contenido de humedad (CH) en las piezas cortas fue medido por medio de un xilohigrómetro resistivo RTU 600 (Gann Mess-u Regeltechnik GmbH, Alemania) en el momento de llevar a cabo las mediciones con técnicas no destructivas y durante la realización de los ensayos mecánicos de acuerdo a la norma UNE-EN 13183-2 (2002). Adicionalmente, el contenido de humedad también fue determinado a través del método en estufa de acuerdo a la norma UNE 13183-1 (2002).

La determinación con xilohigrómetro se llevó a cabo tomando tres mediciones, una central y dos en los extremos separadas a una distancia de 90 cm desde la testa en cada una. El valor adoptado para el contenido de humedad es la media aritmética

de los tres valores a efectos de cálculo. La profundidad de los electrodos con fuste recubierto de teflón alcanzada en las mediciones fue casi el total, sobresaliendo el fuste unos milímetros sobre la superficie de la madera. Las mediciones se realizaron con los electrodos situados de forma perpendicular al eje longitudinal de la pieza.

Por otro lado, las mediciones efectuadas por el método en estufa se realizaron extrayendo una rebanada de 100 mm de longitud tras el ensayo mecánico según la norma UNE-EN 408 (2012). De forma general, los análisis realizados en la presente tesis entre las propiedades mecánicas y la densidad estimada utilizando equipos no destructivos no fueron referenciados al 12 % de humedad. La adopción de esta medida es debido a que las condiciones higrotérmicas del laboratorio de ensayo eran similares a las que la madera estructural estaba sometida en el interior del edificio. Por otro lado, en los trabajos realizados se pretende relacionar las propiedades mecánicas de la madera con las mediciones con equipos no destructivos con un contenido de humedad similar, por este motivo, la corrección por humedad al 12 % de los parámetros empleados podrían generar errores adicionales en la estimación de estas propiedades. En la práctica de una evaluación de una estructura existente, el contenido de humedad de la madera en un edificio protegido de la humedad corresponderá a la humedad de equilibrio higroscópico y las propiedades mecánicas de la madera serán las correspondientes a ese contenido de humedad.

3.4.3 Clasificación Visual

La metodología en las piezas cortas fue similar a la adoptada en el Subcapítulo 3.3 “Piezas largas” Epígrafe 3.3.3 “Clasificación visual”. Se midieron las singularidades de la madera en las piezas cortas de acuerdo con la norma española de clasificación visual para coníferas UNE 56544 (2011). Los parámetros visuales fueron utilizados para la estimación de las propiedades de la madera con modelos lineales simples y múltiples.

El diámetro máximo de los nudos (incluyendo nudos agrupados) se midió en ambas caras y cantos, sobre la longitud completa del vano y sobre el tramo central, como se describe a continuación: el tramo entre RCS1 y RCS5 (la distancia central de 18h, o distancia entre los apoyos del ensayo de flexión), y en el tramo central de 8h (la distancia entre los puntos de carga del ensayo de flexión, 6h, más el doble de la altura de la sección de la viga). Además, sobre la longitud 18h se registraron la desviación de la fibra, los anillos de crecimiento, las bolsas de resina, las fendas, las gemas, la presencia de la médula, deformaciones y ataques biológicos.

El objetivo de considerar la medición en el tramo central de longitud igual a 8h era vincular la nudosidad con la zona sometida a mayor esfuerzo de flexión (tanto en la realidad de vigas con carga uniforme como en el ensayo con cargas en tercios de la luz). Este criterio mostró una correlación más fuerte entre la nudosidad y la resistencia a flexión en comparación con el caso en el que se consideraba la longitud total de la pieza (18h) lo que resultaba coherente con trabajos anteriores (Arriaga et al., 2014). La consideración de la longitud 18h está motivada para representar la globalidad de la pieza salvando posibles defectos en los extremos. Adicionalmente, se analizó el efecto de la nudosidad mediante el parámetro CKDR (Íñiguez-González, 2007). Este valor varía de 0 a 1, y se registró para las distancias centrales de 18 h y 8 h, al igual que el tamaño de los nudos. Por otro lado, se llevó a cabo una clasificación completa (sin tener en cuenta los agentes biológicos), una clasificación parcial considerando los parámetros de nudosidad y desviación de la fibra en la madera para las secciones mencionadas con anterioridad 18h y 8h.

3.4.4 Estimación de la densidad

Se llevó a cabo un análisis para la estimación de la densidad con diferentes equipos no destructivos. Las técnicas empleadas fueron la resistencia a la penetración, arranque de tornillo y extracción de virutas (Osuna-Sequera, Llana, et al., 2019). Adicionalmente, se determinó la densidad global calculada con las dimensiones nominales de las secciones de referencia, suponiendo una geometría rectangular de las piezas, y la densidad real basada en el cociente entre la masa y el volumen de la rebanada de 100 mm extraída para el ensayo de humedad por el método de estufa según la norma 13183-1 (2002) del perímetro ajustado en cada pieza corta, Figura 24.

La medición de los parámetros no destructivos se llevó a cabo en cinco secciones repartidas simétricamente desde el centro de la pieza en su longitud, Figura 26. Se tomaron dos mediciones en cada una de las secciones, una en el canto superior y otra en una de las caras con cada una de las técnicas no destructivas.

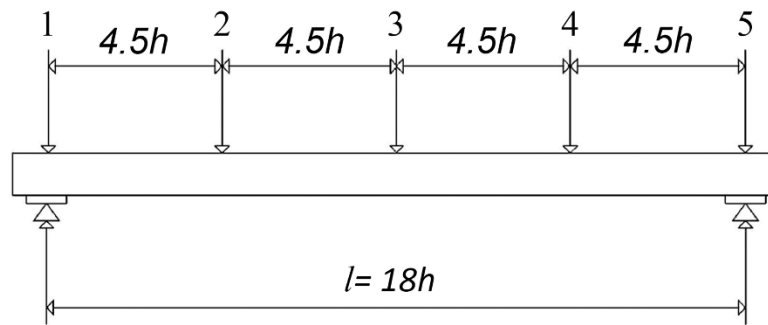


Figura 26. Localización de las mediciones de técnicas no destructivas puntuales en piezas cortas.

Para la estimación de la densidad global y real de rebanada se plantearon modelos de regresión lineal comprobando la correlación entre las variables y los criterios de linealidad, normalidad, homocedasticidad e independencia residual y no colinealidad.

Se llevó a cabo un análisis para determinar cuál sería el número de mediciones más adecuado a realizar en obra para cada técnica y su localización. Para ello se definieron varias secuencias en el orden de medición. Se debe tener en cuenta que en cada sección se realizaron dos mediciones, una en el canto y otra en la cara de la pieza. Los métodos establecidos fueron los siguientes:

Método lineal (linear method, en inglés o LM) como la media acumulativa de las mediciones tomando un orden ascendente de la sección 1 a la 5 definidas en la Figura 24;

Método de testa a centro (end to centre method en inglés o ECM) empleando la secuencia de medición transversal 1, 5, 3, 2 y 4;

Método centro a testa (Centre to end method en inglés o CEM) empleando la secuencia 3, 2, 4, 1 y 5.

El estudio completo puede consultarse en el Capítulo 6 “ESTIMACIÓN DE LA DENSIDAD” (Osuna-Sequera, Llana, et al., 2019).

3.4.5 Módulo de elasticidad dinámico mediante la medición de los tiempos de transmisión de la onda

Se realizó una comparativa entre las mediciones directas, indirectas y semidirectas de las velocidades de onda tomadas en las piezas cortas posicionando los sensores de los equipos acústicos con una configuración similar a la mostrada en la Figura 22. Se determinaron los ratios entre las velocidades de onda obtenidas con diferentes configuraciones de los sensores sobre la pieza y se compararon entre sí. También fueron comparados con trabajos realizados por otros autores y las

características de las piezas empleadas en sus trabajos (Arriaga et al., 2017; Llana, Hermoso, et al., 2018; Osuna-Sequera et al., 2020).

Los módulos de elasticidad dinámicos obtenidos con cada técnica acústica fueron obtenidos a través de la ecuación (6) empleando la densidad real de rebanada y la densidad estimada con técnicas no destructivas, en concreto con WoodEx. Pudo comprobarse que los resultados de predicción de ambos procedimientos eran prácticamente iguales, con lo que se concluye que el uso de la densidad estimada con WoodEx es un método adecuado para la inspección *in-situ*. Adicionalmente, se realizaron modelos lineales múltiples para la predicción del MOE estático y el MOR como variables dependientes y la velocidad de onda, la densidad, el CKDR, el tamaño relativo de nudo máximo en el canto y la desviación de la fibra como variables independientes.

Se pueden consultar con mayor detalle los resultados y modelos obtenidos en el Capítulo 7 “PREDICCIÓN CON MÉTODOS ACÚSTICOS” (Arriaga et al., 2022).

3.4.6 Módulo de elasticidad dinámico mediante vibración longitudinal

Se llevó a cabo un ensayo de vibración longitudinal en las piezas cortas con PLG. Para ello, cada pieza se apoyó en sus extremos sobre las balanzas de manera similar a las piezas largas, Figura 23. La pieza se hace vibrar con un impacto de martillo en uno de los extremos y la señal acústica se recoge a través de un micrófono en el extremo opuesto de donde se obtiene la frecuencia de vibración natural.

Se llevaron a cabo regresiones lineales entre el MOR y MOE_{dyn} . El MOE_{dyn} fue obtenido a través de la frecuencia de vibración natural de la madera con la ecuación (8). Para el cálculo del MOE_{dyn} se consideró la densidad real de rebanada y, por otro lado, la densidad obtenida con el método de extracción de virutas simulando su obtención *in-situ*.

Se definieron 4 tipos de sección nominal: la sección A se define como la media de la sección nominal medida con forcípula, Figura 24, en todas las secciones transversales de referencia, Figura 26; la sección B se define como la media de las secciones nominales centrales 2, 3 y 4; la sección C es la sección nominal medida en el extremo 1; y la sección D es la sección nominal central 3.

Por otra parte, se efectuaron regresiones lineales múltiples con los parámetros de nudosidad máxima en cara y canto, fendas y desviación de la fibra, realizando una

selección negativa de variables, eliminando las que no mantienen una relación significativa a través del p-valor.

Adicionalmente, se realizaron regresiones lineales simples separando las piezas correspondientes a la parte inferior del árbol y a la parte superior. Por último, se proponen modelos de predicción múltiples para la estimación del MOE_{sta} y MOR teniendo en cuenta los parámetros: MOE_{dyn} , nudosidad máxima en el canto entre ancho nominal del canto y desviación de la fibra.

3.4.6.1 Efecto de la variación de la sección

Para llevar a cabo este estudio, se siguió la misma metodología de medición con forcípula (Figura 24) como en el epígrafe 3.3.6 “Efecto de la variación en la geometría de la sección en mediciones con técnicas no destructivas (acústicas y vibración) en piezas largas”.

En cada pieza pequeña se efectuaron cinco mediciones de la sección transversal en las secciones de referencia (reference cross-section en inglés, RCS) con forcípula. La posición de las mediciones de las secciones transversales son las expuestas en la Figura 25.

Se establecieron cuatro métodos para definir una sección nominal para el cálculo dependiendo del número y posición de los RCS seleccionados para calcular el valor medio, Figura 27. Los métodos propuestos fueron A: que consiste en medir todas las RCS de la pieza (5 mediciones); B: considerar solo las RCS2, RCS3 y RCS4 como mediciones centrales; C: considerar solo un extremo en RCS1; y D: considerar solo la medición central en RCS3, Figura 27. El fin de esta metodología es encontrar con qué sección nominal para el cálculo del MOE_{dyn} se obtendría la mejor correlación y el menor error en los modelos obtenidos entre el MOE_{dyn} con vibración y el MOE_{sta} del ensayo mecánico.

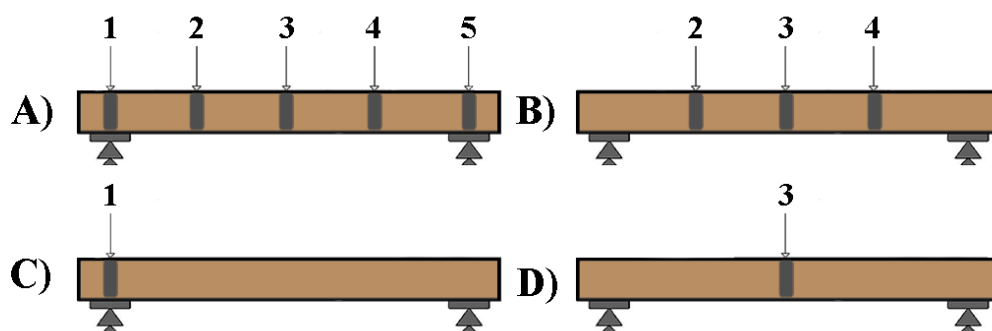


Figura 27. Esquema de los métodos A, B, C y D para la determinación de una sección nominal de la pieza.

3.4.6.2 *Influencia de la posición de la pieza en el árbol*

Entre los diversos análisis llevados a cabo en la presente tesis, se quiere analizar la posible variación de las propiedades físico-mecánicas en piezas de madera procedentes de pares de una cubierta, considerando la orientación de las mismas en relación con la posición original del árbol. Se plantea la idea de que la parte baja del árbol, ubicada en la parte inferior de la estructura, presenta una mayor proporción de duramen, lo cual le confiere una mayor resistencia a la humedad y a los ataques biológicos. Sin embargo, se plantea la hipótesis de que la acumulación de agua en la parte inferior de la cubierta, debido a fugas de la misma, podría afectar a las propiedades físico-mecánicas de los elementos estructurales. Por lo tanto, se busca estudiar si existe una variación significativa en estas propiedades al comparar la parte inferior y superior de las piezas largas al cortarse en dos piezas de menor longitud. El estudio se llevará a cabo mediante ensayos no destructivos y destructivos de las propiedades físico-mecánicas y su posterior análisis estadístico. Los resultados de esta investigación podrían proporcionar información relevante para mejorar la práctica de colocación de las piezas de madera en estructuras de cubierta y promover su preservación en el tiempo.

La identificación de la posición de la pieza referente a la posición original que tenía el árbol se puede hacer observando diferentes parámetros. Entre ellos, se encuentran: la forma de los extremos de los pares (Figura 4), de la dirección de los nudos en las caras de corte radial y del sentido del repelo en la superficie de las caras y cantos de las piezas.

Se pueden consultar con mayor detalle los resultados obtenidos en el Capítulo 6 “ESTIMACIÓN DE LA DENSIDAD” (Osuna-Sequera, Llana, et al., 2019).

3.4.7 *Ensayos mecánicos a flexión*

Las piezas cortas se ensayaron a flexión de acuerdo a la norma UNE-EN 408 (2012). Los parámetros obtenidos fueron el MOE_{sta} y el MOR. Se llevó a cabo un ANOVA y test de múltiples rangos para determinar si existían diferencias estadísticas significativas entre las piezas provenientes de la parte inferior del tronco y de la parte superior para ambas variables.

Las propiedades físico-mecánicas (densidad, MOE y MOR) fueron analizadas a partir de modelos de regresión lineal. Se realizaron análisis de estas variables mecánicas separando las 42 piezas (originadas por el corte de las piezas largas) provenientes de la parte superior (grupo I) y de la parte inferior del árbol (grupo II)

para comprobar si existían diferencias o tendencias en las diferentes partes del árbol.



Figura 28. Ejemplo la disposición del ensayo a flexión de la pieza corta No. 13-II de acuerdo con la norma UNE-EN 408 (2012). Fenómeno de fallo: rotura por cortante.

4 INFLUENCIA DE LA VARIACIÓN DE LA SECCIÓN

Habitualmente los elementos estructurales provenientes de construcciones de madera existentes presentan irregularidades geométricas en su sección transversal a lo largo de su longitud. Estas irregularidades afectan directamente a los parámetros mecánicos estimados o determinados a través de técnicas no destructivas y destructivas. Estos aspectos tienen un impacto directo en el tiempo de inspección y, por lo tanto, en el coste y la fiabilidad de los resultados obtenidos.

Por este motivo, el siguiente artículo afronta esta problemática desde el punto de vista práctico y teórico analizando cómo obtener una sección transversal nominal representativa de los elementos estructurales y la influencia que puede tener la geometría en la determinación del módulo de elasticidad estático (MOE_{sta}).

Los equipos empleados fueron SYL (ultrasonidos), USLab (ultrasonidos), MST (ondas de impacto) y PLG (vibración). Las probetas analizadas en este trabajo fueron las 21 piezas largas con dimensiones nominales de 150 x 200 x 11000 mm³. Entre los principales resultados se encontró una buena correlación entre el MOE_{sta} y los parámetros obtenidos con las mediciones no destructivas. Como recomendación se propuso el mejor criterio para asignar la sección transversal nominal con el fin de mejorar la precisión de los modelos obtenidos reduciendo el número de mediciones la geometría.

Referencia: Osuna-Sequera, C., Llana, D. F., Íñiguez-González, G., & Arriaga, F. (2020). The influence of cross-section variation on bending stiffness assessment in existing timber structures. *Engineering Structures*, 204. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110082>